

DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO
*Influência do Método de Ensaio na Determinação da Extensão
Total na Força Máxima*

Ricardo André Cardoso Mendes

Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Estruturas
Dissertação

ORIENTADORES: Doutora Ana Sofia Miranda da Silva Louro
Doutora Cristina Ferreira de Oliveira

Março de 2016

Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal

DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO
Influência do Método de Ensaio na Determinação da Extensão Total na Força Máxima

Mestrado em Engenharia Civil

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Ricardo André Cardoso Mendes

(assinatura)

DIREITOS DE CÓPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Ricardo André Cardoso Mendes

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A meus Pais

À memória do meu Avô Alexandre

AGRADECIMENTOS

A presente Dissertação foi elaborada na Unidade de Produtos Metálicos do Núcleo de Comportamento de Estruturas do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil em cujo estudo de investigação se integra. Agradeço a esta Instituição as oportunidades concedidas e os meios postos à minha disposição para a realização deste estudo.

Apresento em primeiro lugar os meus sinceros e reconhecidos agradecimentos à minha orientadora científica Doutora Ana Sofia Miranda da Silva Louro, Bolseira de Pós-Doutoramento do Núcleo de Comportamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela valiosa orientação científica e inestimável ajuda prestada ao longo deste trabalho. Agradeço-lhe as sugestões apresentadas na elaboração da Dissertação e a excelente relação de trabalho mantida. Agradeço-lhe todos os conhecimentos transmitidos dentro e fora do âmbito da Dissertação, bem como a disponibilidade e amizade demonstrada.

À Doutora Cristina Ferreira de Oliveira, Professora Adjunta da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal, expresso os meus sinceros agradecimentos pelo seu empenho na realização deste trabalho, nomeadamente pela disponibilidade demonstrada no decorrer das diferentes fases, permitindo encontrar o caminho para a sua concretização.

Ao Eng.º José Luís Louro, Técnico Superior e Coordenador da Unidade de Produtos Metálicos desejo manifestar um especial agradecimento pelos ensinamentos e amizade demonstrada, não só ao longo da elaboração da Dissertação, mas também ao longo da minha carreira no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Ao Eng.º Manuel Pipa, Investigador Principal e Chefe do Núcleo de Observação de Estruturas, expresso os meus sinceros agradecimentos pelo interesse demonstrado e pelo acompanhamento contínuo na realização deste trabalho.

Ao Eng.º Luís Lages Martins, Bolseiro de Pós-Doutoramento do Núcleo de Qualidade Metrológica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pelo apoio e ajuda no cálculo de incertezas de medição e pelas valiosas sugestões apresentadas.

Ao Joaquim Manuel Pereira, Técnico de Ensaios da Unidade de Produtos Metálicos, manifesto o meu agradecimento pela ajuda prestada na realização dos ensaios de tração e obtenção de resultados experimentais. Agradeço-lhe as sugestões e toda a documentação que colocou ao meu dispor.

Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas que me incentivaram e ajudaram para que a apresentação do trabalho se tornasse possível.

RESUMO

O objetivo fundamental deste trabalho é estudar e analisar as propriedades relacionadas com a ductilidade das armaduras de aço para betão armado. Dado que estas armaduras são usadas em estruturas dimensionadas para resistir a ações sísmicas, avalia-se a influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima.

Para a realização de ensaios de tração em varões de aço para betão armado pode, de acordo com o especificado nas normas de referência (ISO 6892-1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010), recorrer-se à utilização de dois métodos diferentes para avaliar a extensão total na força máxima dos provetes: método manual e método automático.

No primeiro caso (método manual) a extensão total na força máxima é determinada a partir da medição da deformação do provete após rotura e, na medição automática a extensão total na força máxima é obtida diretamente a partir do registo do extensómetro instalado no provete a ensaiar.

Para se avaliar a influência do método de ensaio nos valores da extensão total na força máxima realizaram-se ensaios de tração em 310 varões de aço, de cinco classes de resistência e envolvendo 9 diâmetros diferentes, em que foram usados, em simultâneo, os dois métodos de determinação da extensão total na força máxima previstos nas normas de referência.

A análise da influência do método de ensaio foi feita recorrendo à: (i) determinação da extensão total na força máxima com instalação de dois extensómetros no centro do provete; (ii) determinação da extensão total na força máxima com instalação dos extensómetros na zona superior e inferior do provete; (iii) determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete após rotura em quatro zonas distintas ao longo do provete; (iv) determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete na força máxima de ensaio.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que os dois métodos preconizados conduzem à obtenção de valores díspares para a extensão total na força máxima, uma vez que os resultados são obtidos em diferentes estádios de deformação do provete.

Tendo em conta que, em caso de litígio, a norma prevê que seja a medição manual a prevalecer, este estudo contribui para o esclarecimento da origem das diferenças que sistematicamente se verificam nos resultados da extensão total na força máxima e apresenta uma contribuição para a harmonização dos documentos normativos existentes sobre esta matéria e para a melhoria dos critérios de controlo utilizados no âmbito da certificação dos varões de aço para betão armado.

PALAVRAS-CHAVE: betão armado; varões de aço; ensaio de tração; influência do método; ductilidade.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to study and analyse the ductility-related properties of steel rebars for reinforced concrete. Given the fact that these steel rebars can be used in seismic resistant structures, this work aims at evaluating the influence of the measurement method of the percentage total extension at maximum force.

According to reference testing standards (ISO 6892-1, 2009) and (ISO 15630-1, 2010), two different methods can be used to obtain the total extension at maximum force from tensile tests of steel rebars for reinforced concrete: manual and automatic methods.

In the former case (manual method), the total extension at maximum force is determined from the elongation values measured from the test specimen after tensile fracture, whereas in the latter case (automatic method) the total extension at maximum force is calculated from the readings of a strain gauge extensometer installed on the test specimen.

In order to assess the influence of the measurement method in the total extension at maximum force values, 310 tensile tests of steel rebars have been performed, considering five classes of resistance and different rebar diameters, and for each test the two methods to determine the total extension at maximum force were used.

The analysis of the influence of the measurement method was carried out by: (i) determining the total extension at maximum force from two strain gauges positioned at the centre of the test specimen; (ii) determining the total extension at maximum force from two strain gauges positioned at the upper and lower parts of the test specimen; (iii) determining the total extension at maximum force from measurements of the elongation of the test specimen, after fracture in four distinctive areas along the length of the specimen; (iv) determining the total extension at maximum force from measurements of the elongation of the test specimen at the maximum force value measured during the test.

The results obtained from the present work highlight that the two testing methods lead to different values of the total extension at maximum force, once the results are obtained in different stages of the specimen deformation.

Taking into account that in case of dispute, the reference standards dictate that the manual measurements prevail, this work provides a contribution for the understanding of the differences that systematically occur in the results of total extension at maximum force, for the harmonization of the existing normative documents concerning this topic and for the improvement of the control criteria used in the certification of steel rebars for reinforced concrete.

KEYWORDS: reinforced concrete; steel rods; tensile testing; influence of the measurement method; ductility.

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO.....	5
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	5
2.2. CONCEITOS DE METALURGIA.....	5
2.2.1.Ligação atômica.....	5
2.2.2.Ligações metálicas	5
2.2.3.Diagramas de equilíbrio	8
2.2.4.Solidificação	9
2.2.5.Ligas ferro-carbono.....	9
2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE AÇO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO EM BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO.....	10
2.3.1.Processo de fabrico de produtos de aço	10
2.3.2.Tipos de produtos de aço	13
2.3.3.Processo de fabrico de produtos de aço para betão	15
2.3.4.Principais características mecânicas e tecnológicas dos aços para betão estrutural ..	24
3. ENSAIO DE TRAÇÃO DOS PRODUTOS DE AÇO PARA BETÃO ESTRUTURAL.....	29
3.1. NORMAS APLICÁVEIS	29
3.2. DEFINIÇÃO DAS PRINCIPAIS GRANDEZAS ENVOLVIDAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	31
3.3. CONDIÇÕES DE ENSAIO	35
3.4. PROPRIEDADES OBTIDAS A PARTIR DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	36
3.4.1.Determinação da área da secção inicial da zona útil.....	36

3.4.2. Determinação da extensão após rotura	37
3.4.3. Determinação da extensão total na força máxima à tração.....	37
3.4.4. Determinação da tensão limite convencional de proporcionalidade	39
3.4.5. Determinação da tensão de cedência superior e da tensão de rotura à tração	39
3.5. COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DOS PRODUTOS DE AÇO PARA BETÃO ESTRUTURAL.....	40
3.5.1. Armaduras obtidas por laminagem a quente.....	40
3.5.2. Armaduras obtidas por endurecimento a frio	42
4. EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA	45
4.1. INTRODUÇÃO.....	45
4.2. DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO	45
4.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A DUCTILIDADE DOS ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO	47
4.4. GARANTIA DA QUALIDADE DAS ARMADURAS PARA BETÃO ARMADO.....	50
4.4.1. Generalidades	50
4.4.2. Procedimento de controlo de conformidade de produto	50
4.4.3. Certificação.....	51
4.4.4. Ensaio de receção	54
4.5. INCERTEZA DE MEDIÇÃO	57
4.5.1. Introdução.....	57
4.5.2. Evolução histórica do conceito de medição	58
4.5.3. Avaliação da incerteza de medição.....	59
4.5.4. Avaliação das incertezas de medição da extensão total na força máxima	65
5. CAMPANHA EXPERIMENTAL	71
5.1. INTRODUÇÃO.....	71
5.2. DEFINIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	71
5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	73
5.3.1. Estufa	73
5.3.2. Balança	74
5.3.3. Máquina de marcação equidistante ao longo da zona útil do provete	75

5.3.4. Máquina de ensaios de força	75
5.3.5. Extensómetros.....	76
5.3.6. Paquímetro digital.....	78
5.4. SOFTWARE & SISTEMA DE REGISTO E TRATAMENTO DE DADOS	79
5.4.1. Software	79
5.4.2. Sistema de registo e tratamento de dados.....	82
5.5. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	83
5.6. DETERMINAÇÕES PARA A AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO	84
5.6.1. Determinação da extensão total na força máxima através da instalação dos extensómetros no centro do provete	85
5.6.2. Determinação da extensão total na força máxima através da instalação dos extensómetros na zona superior e inferior do provete.....	86
5.6.3. Determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete após rotura em quatro zonas distintas ao longo do provete.....	87
5.6.4. Determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete na força máxima de ensaio	88
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	89
6.1. INTRODUÇÃO.....	89
6.2. RESULTADOS OBTIDOS.....	89
6.2.1. Determinação da extensão total na força máxima através da instalação dos extensómetros no centro do provete	90
6.2.2. Determinação da extensão total na força máxima através da instalação dos extensómetros na zona superior e inferior do provete.....	94
6.2.3. Determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete após rotura em quatro zonas distintas ao longo do provete.....	96
6.2.4. Determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete na força máxima de ensaio	99
6.3. SISTEMATIZAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS.....	101
6.4. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA	105
6.4.1. Incerteza de medição da extensão total na força máxima – método automático.....	105

6.4.2. Incerteza de medição da extensão total na força máxima – método manual	106
6.4.3. Análise comparativa de métodos de medição	108
7. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	111
7.1. SÍNTESE DO ESTUDO DESENVOLVIDO.....	111
7.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	112
7.3. RECOMENDAÇÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	112
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
ANEXO A	121
ANEXO B	139
ANEXO C	151
ANEXO D	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura cristalina da ligação metálica (Relatório 331 - DE/NCE, 2009)	6
Figura 2 - Estruturas atômicas da ligação metálica (Smith, W., 1998)	7
Figura 3 - Diagrama de equilíbrio da liga ferro-carbono (Relatório 331 - DE/NCE, 2009)	9
Figura 4 - Esquema representativo do funcionamento do Alto-forno (Rocha, J., 2009).....	11
Figura 5 - Forno de arco elétrico (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).....	12
Figura 6 - Tratamento mecânico (Fapricela, 2015)	15
Figura 7 - Vazado de forma contínua (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).....	16
Figura 8 - Varões laminados a quente: (a) produto reto; (b) produto em rolo (Megasa, 2015)	17
Figura 9 - Redes eletrossoldadas (Megasa, 2015).....	18
Figura 10 - Geometria das nervuras do aço do tipo A400 NR (Especificação E 449, 2010)	22
Figura 11 - Geometria das nervuras do aço do tipo A500 NR (Especificação E 450, 2010).....	22
Figura 12 - Geometria das nervuras do aço do tipo A400 NR SD (Especificação E 455, 2010)	22
Figura 13 - Geometria das nervuras do aço do tipo A500 NR SD (Especificação E 460, 2010)	23
Figura 14 - Geometria das nervuras do aço do tipo A500 ER (Especificação E 456, 2011)	23
Figura 15 - Código de marcas de identificação dos varões nervurados (LNEC, 2015).....	23
Figura 16 - Definição do alongamento (ISO 6892-1, 2009)	33
Figura 17 - Tensão limite convencional de proporcionalidade (ISO 6892-1, 2009)	33
Figura 18 - Provete maquinado (ISO 6892-1, 2009)	34
Figura 19 - Tensões de cedência superior e inferior (ISO 6892-1, 2009).....	34
Figura 20 - Máquina de marcação equidistante ao longo da zona útil dos provetes	38
Figura 21 - Paquímetro digital	38
Figura 22 - Diagrama tensão-extensão de um aço laminado a quente (D'Árga e Lima, J., 1983)	40
Figura 23 - Tensão limite convencional de proporcionalidade (D'Árga e Lima, J., 1983)	42
Figura 24 - Diagrama tensões-extensões de aço antes e após "trabalho a frio" (D'Árga e Lima, J., 1983)	43

Figura 25 - Comparação entre diagramas tensão-extensão (D'Arga e Lima, J., 1983).....	44
Figura 26 - Diagrama tensão-extensão típico dos cinco tipos de aço (Louro, A., 2014)	46
Figura 27 - Resposta de um oscilador à ação de um sismo. a) Resposta elástica e b) Resposta elastoplástica (Pipa, M., 1993)	48
Figura 28 - Resposta de uma estrutura elástica e de uma estrutura elastoplástica admitindo igualdade de deslocamento máximo (Pipa, M., 1993).....	49
Figura 29 - Regulamento dos produtos de construção (adaptado de: Moreira, C. et al, 2008)	55
Figura 30 - Perspetiva clássica do conceito de medição (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)	58
Figura 31 - Perspetiva moderna do conceito de medição (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)	58
Figura 32 - Desvio e incerteza de medição (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009).....	59
Figura 33 - Distribuição normal (IOS, 2008).....	61
Figura 34 - Distribuição retangular ou uniforme (IOS, 2008)	63
Figura 35 - Distribuição triangular (IOS, 2008).....	63
Figura 36 - Diagrama funcional associada à grandeza A_{gt} (método automático)	66
Figura 37 - Diagrama funcional associada à grandeza A_{gt} (método manual)	67
Figura 38 - Estufa	74
Figura 39 - Balança.....	75
Figura 40 - Equipamento de marcação equidistante ao longo da zona útil dos provetes	75
Figura 41 - Máquina de ensaios mecânicos.....	76
Figura 42 - Extensómetro INSTRON	77
Figura 43 - Extensómetro EPSILON.....	78
Figura 44 - Paquímetro digital	78
Figura 45 - Fita métrica	79
Figura 46 - Extensómetros: (a) EPSILON 3543; (b) INSTRON M300B.....	80
Figura 47 - Configuração dos parâmetros a determinar no ensaio de tração.....	80
Figura 48 - (a) Tensão de cedência superior e inferior; (b) Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%.....	81
Figura 49 - Extensómetros a remover antes da rotura do provete.....	81
Figura 50 - (a) Limites para a remoção dos extensómetros; (b) Definição de parâmetros na remoção dos extensómetros.....	82

Figura 51 - Representação esquemática da instalação dos extensómetros no centro do provete.....	83
Figura 52 - Representação esquemática da instalação dos extensómetros na parte superior e inferior do provete.....	83
Figura 53 - Representação esquemática das zonas para medição do comprimento entre referências (método manual).....	84
Figura 54 - Extensómetros instalados no centro do provete.....	85
Figura 55 - Medição da extensão permanente na força máxima	86
Figura 56 - Extensómetros instalados em zonas distintas do provete	86
Figura 57 - Representação das diferentes zonas de um provete, sujeitas a medição da extensão permanente na força máxima, A_g	87
Figura 58 - Medição da extensão permanente na força máxima de ensaio	88
Figura 59 - Valor da extensão total na força máxima determinado pelo <i>software</i> PARTNER com base nos registos do extensómetro INSTRON.....	92
Figura 60 - Valor da extensão total na força máxima determinado pelo método manual	92
Figura 61 - Representação do sistema de fixação do extensómetro EPSILON ao provete de aço.....	93
Figura 62 - (a) Representação esquemática das zonas de determinação da extensão total na força máxima A_{gt} ; (b) Representação da medição da deformação do provete após rotura A_g	95
Figura 63 - Representação das zonas de medição: varão de aço A400 NR com 16 mm.....	96
Figura 64 - Representação das zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 20 mm	97
Figura 65 - Representação das zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 25 mm	98
Figura 66 - Representação das zonas de medição: varão de aço A500 NR SD com 14 mm	98
Figura 67 - Representação da incerteza expandida associada aos métodos de medição.....	109

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química dos aços (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)	13
Quadro 2 - Produtos de aço para armaduras de betão armado (Especificações LNEC, 2008, 2010, 2011 e 2012).....	20
Quadro 3 - Identificação de acordo com o país de origem do produto (LNEC, 2015)	24
Quadro 4 - Características mecânicas dos varões de aços para betão armado (Especificação E 449, 2010) (Especificação E 450, 2010) (Especificação E 455, 2010) (Especificação E 460, 2010) e (Especificação E 456, 2011).....	27
Quadro 5 - Limites de velocidade aplicação da força (ISO 6892-1, 2009)	36
Quadro 6 - Classe de ductilidade nas armaduras de aço para betão armado (NP EN 1998-1, 2013) ..	47
Quadro 7 - Ensaio realizado na concessão da certificação a varões de aço para betão armado (PE.PSG.01 Ed. 7, 2009) (PE.PSG.06 Ed. 9, 2013) (PE.PSG.10 Ed. 5, 2013).....	52
Quadro 8 - Ensaio realizado no acompanhamento da certificação a varões de aço para betão armado (PE.PSG.01 Ed. 7, 2009) (PE.PSG.06 Ed. 9, 2013) (PE.PSG.10 Ed. 5, 2013)	53
Quadro 9 - Guia para a seleção das classes de inspeção (NP ENV 13670-1, 2007)	56
Quadro 10 - Ensaio de receção (NP ENV 13670-1, 2007).....	57
Quadro 11 - Distribuição <i>t-student</i> (IOS, 2008)	65
Quadro 12 - Resumo dos ensaios de tração realizados por diâmetro e por tipo de aço.....	72
Quadro 13 - Origem e identificação das amostras ensaiadas	73
Quadro 14 - Nomenclatura adotada para as diversas medições de A_{gt} efetuadas no âmbito deste estudo.....	73
Quadro 15 - Extensómetros na zona central: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama baixa	90
Quadro 16 - Extensómetros na zona central: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama média	90
Quadro 17 - Extensómetros na zona central: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama alta	91
Quadro 18 - Extensómetros em zonas distintas: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama média.....	94

Quadro 19 - Extensómetros em zonas distintas: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama alta	94
Quadro 20 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A400 NR com 16 mm	97
Quadro 21 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 20 mm.....	97
Quadro 22 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 25 mm.....	98
Quadro 23 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A500 NR SD com 14 mm.....	99
Quadro 24 - Medição com paquímetro na força máxima: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama baixa.....	100
Quadro 25 - Medição com paquímetro na força máxima: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama média.....	100
Quadro 26 - Valor médio da extensão total na força máxima em função do diâmetro e tipo de aço para as diferentes condições de ensaio - gama baixa.....	102
Quadro 27 - Valor médio da extensão total na força máxima em função do diâmetro e tipo de aço para as diferentes condições de ensaio - gama média	103
Quadro 28 - Valor médio da extensão total na força máxima em função do diâmetro e tipo de aço para as diferentes condições de ensaio - gama alta	104
Quadro 29 - Resultados da avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do extensómetro EPSILON.....	105
Quadro 30 - Resultados da avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do extensómetro INSTRON	106
Quadro 31 - Resultados da avaliação da incerteza de medição da tensão de rotura à tração, R_m	107
Quadro 32 - Resultados da avaliação da incerteza associada à extensão permanente na força máxima, A_g	107
Quadro 33 - Resultados da avaliação da incerteza de medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do método manual	108

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

MAIÚSCULAS LATINAS

A	Extensão após rotura [%]
A_{gt}	Extensão total na força máxima [%]
$A_{gt} F_{máx}$	Extensão manual na força máxima de ensaio [%]
A_g	Extensão permanente na força máxima [%]
E	Módulo de elasticidade do aço [GPa]
E	Processo de fabrico: Laminado a frio
F_{eH}	Força de cedência da armadura [kN]
F_m	Força de rotura à tração da armadura [kN]
$F_{p0,2}$	Força limite convencional de proporcionalidade a 0,2 % [kN]
L	Condições de superfície: Lisa
L_c	Comprimento da zona útil [mm]
L_{def}	Deformação medida pelo extensómetro no momento de aplicação da força máxima [mm]
L_e, L_{base}	Comprimento da base do extensómetro [mm]
L_u	Comprimento final entre referências [mm]
L_0	Comprimento inicial entre referências [mm]
N	Processo de fabrico: Laminado a quente
R	Condições de superfície: Rugosa
R_e, R_{eH}, R_{eL}	Tensão de cedência da armadura [MPa]
R_m	Tensão de rotura à tração da armadura [MPa]
R_p	Tensão limite convencional de proporcionalidade da armadura [MPa]
$R_{p0,1}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% de extensão na armadura [MPa]
$R_{p0,2}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% de extensão na armadura [MPa]
SD	Ductilidade especial
S_o	Área efetiva da secção inicial da zona útil da armadura [mm ²]
$S_{o,nom}$	Área nominal da secção transversal da armadura [mm ²]

S_x	Desvio padrão experimental
U_p	Incerteza de medição expandida
V_c	Valor convencional
V_m	Valor da medição
V_V	Valor verdadeiro da grandeza
\bar{X}	Valor médio
X_k	Valores medidos
Y	Mensuranda

MINÚSCULAS LATINAS

c_i	Coeficiente de sensibilidade
d	Diâmetro efetivo da armadura
f_{su}	Tensão de rotura à tração da armadura [MPa]
f_{sy}	Tensão de cedência da armadura [MPa]
$f_{y,k}$	Valor característico da tensão de cedência da armadura [MPa]
k	Fator de expansão
n	Dimensão da amostra
u_x	Incerteza padrão
v_i	Graus de liberdade
y	Incerteza padrão da estimativa

MINÚSCULAS GREGAS

ε	Erro absoluto da medição
δ	Desvio
σ_x	Desvio padrão da população
η	Coeficiente de comportamento
μ	Coeficiente de comportamento para deformação

ACRÓNIMOS

BF	Altos-Fornos
BOF	Altos-Fornos com convertidores
CCC	Cúbica de corpo centrado
CEN	Comité Europeu de Normalização
CERTIF	Associação para a Certificação de Produtos

CFC	Cúbico de faces centradas
DE	Departamento de Estruturas
EAF	Fornos de arco elétrico
EN	<i>European Standard</i>
FDP	Função Densidade de Probabilidade
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
HC	Hexagonal compacto
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEC-EM	Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Ensaios e Metrologia
LPI	Lei da Propagação de Incertezas
L1G	Comprimento final entre referências medido na extremidade 1 do lado da garra inferior [mm]
L2G	Comprimento final entre referências medido na extremidade 2 do lado da garra superior [mm]
L1R	Comprimento final entre referências medido na extremidade 1 do lado da rotura inferior [mm]
L2R	Comprimento final entre referências medido na extremidade 2 do lado da rotura superior [mm]
NCE	Núcleo de Comportamento de Estruturas
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
UPM	Unidade de Produtos Metálicos

1

Introdução

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

O trabalho que se apresenta surge no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal, e está enquadrado na Estratégia de I&D&I 2013-2020 do Departamento de Estruturas (DE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Relatório 204 - DE/LNEC, 2015) mais concretamente na linha prioritária de investigação denominada "*Qualidade de materiais, segurança e robustez estrutural*" que tem como acrónimo ASSURE.

Pretende-se com o presente estudo analisar de forma sintética mas sistemática dois métodos distintos da determinação da extensão total na força máxima: (i) método manual; (ii) e método automático, tendo como objetivo principal avaliar a influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima (A_{gt}), tendo em consideração que este é um dos parâmetros que controla a ductilidade dos varões de aço existentes no mercado.

No Departamento de Estruturas do LNEC existe desde longa data uma preocupação continuada com o estudo da ductilidade dos varões de aço para betão armado que se tem refletido nos trabalhos desenvolvidos por (Pipa, M., 1993), (Relatório 202 - NCE, 2002) e (Filipe, J. et al, 2014), entre outros.

As características dos varões de aço são um aspeto essencial à avaliação do comportamento de elementos de betão armado, na medida em que os varões de aço asseguram a resistência do elemento estrutural em relação aos estados limite últimos e contribuem para assegurar um comportamento adequado nas condições de serviço.

Uma das características mecânicas do aço dos varões para betão armado determinadas através do ensaio de tração é a extensão total na força máxima. Esta característica permite avaliar a ductilidade do aço do varão, sendo por isso importante na apreciação do seu desempenho em regime elastoplástico.

Ao longo da evolução dos regulamentos de estruturas para betão armado tem sido dada cada vez mais importância a este parâmetro. O conceito de ductilidade de um elemento define-se como sendo a capacidade do elemento dissipar energia de uma forma estável e controlada, de forma a explorar o seu regime elastoplástico, isto é, a capacidade do material para suportar grandes deformações sem perda de capacidade resistente, evitando assim uma rotura frágil.

De acordo com a Norma Internacional (ISO 6892-1, 2009), a extensão total na força máxima é obtida através da soma de duas parcelas: a extensão elástica e a extensão permanente (A_g), e que corresponde à extensão que se obtém para o valor máximo da tensão de rotura (R_m), no registo do diagrama tensão-extensão de um ensaio de tração.

Atualmente constata-se que, em geral, os resultados obtidos para a extensão total na força máxima apresentam uma dispersão bastante mais elevada que os resultados obtidos para outras características avaliadas através do ensaio de tração, tais como a tensão de cedência ou a tensão de rotura, por exemplo. A grande dispersão dos valores da extensão total na força máxima pode conduzir a uma estimativa demasiado conservativa do respetivo valor característico e, no limite, à violação dos critérios de classificação do aço do varão numa dada classe de ductilidade.

Nos últimos anos houve uma revisão das técnicas utilizadas no ensaio de tração dos varões de aço para betão armado, preconizadas nas Normas Internacionais (ISO 6892 -1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010). Estas normas foram entretanto adotadas como Normas Europeias pelo CEN e, como tal, encontram-se em vigor em Portugal.

Portanto, no presente trabalho determinam-se, segundo os critérios normativos previstos, os valores da extensão total na força máxima através de ensaios de tração de varões de aço para betão armado com diferentes origens, diâmetros e classes de resistência. Os resultados para a propriedade em análise foram obtidos recorrendo aos diferentes métodos de medição previstos nas normas de referência (ISO 6892-1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010).

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação tem como principal objetivo contribuir para um maior conhecimento científico relativo à medição da propriedade que controla a ductilidade das armaduras de aço. Neste contexto, foi realizado ensaios de tração em varões de aço para betão armado e, com base nos dados obtidos, pretende-se aprofundar, questões relacionadas com os métodos de medição da deformação do provete de aço no cálculo da extensão total na força máxima.

Como objetivos secundários pretende-se estabelecer uma correlação entre as causas e consequências destas fontes de incerteza, e de elaborar procedimentos pormenorizados de ensaio e de medição que permitam minorar os seus efeitos, na dispersão dos valores da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado.

Este trabalho pretende vir a contribuir para a eliminação das discordâncias atualmente existentes entre disposições de normas diferentes, promovendo, deste modo, a harmonização dos documentos normativos existentes sobre esta matéria, e a melhoria dos critérios de controlo utilizados no âmbito da certificação dos varões de aço para betão armado.

1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação encontra-se organizada em sete capítulos:

No Capítulo 1 – INTRODUÇÃO apresenta-se o enquadramento do tema, descreve-se a motivação, estabelecem-se os objetivos e expõe-se a estrutura e organização da dissertação.

No Capítulo 2 – ESTUDO BIBLIOGRÁFICO aborda-se o aço como material, descrevem-se os conceitos relacionados com os produtos de aço utilizados na construção em betão armado, referindo-se brevemente a caracterização metalúrgica e a descrição dos processos de fabrico bem como as propriedades mecânicas do material.

No Capítulo 3 – ENSAIO DE TRAÇÃO DOS PROVETES DE AÇO PARA BETÃO ESTRUTURAL apresenta-se um resumo sobre as principais normas e especificações técnicas aplicáveis ao ensaio de tração dos produtos de aço utilizados nos elementos estruturais de betão armado.

No Capítulo 4 – EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA estuda-se a importância da ductilidade das armaduras de aço para betão armado com maior ênfase e descreve-se a metodologia adotada para a avaliação das incertezas de medição da extensão total na força máxima.

No Capítulo 5 – CAMPANHA EXPERIMENTAL descreve-se de forma pormenorizada o procedimento experimental adotado na realização deste trabalho, sintetizando-se as metodologias de ensaio usadas na caracterização dos aços estudados.

No Capítulo 6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS apresentam-se os resultados alcançados, sendo feita uma comparação sistemática entre os resultados obtidos através das diferentes metodologias para a determinação da extensão total na força máxima, bem como uma análise crítica dos mesmos.

No Capítulo 7 – CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS elabora-se uma síntese do trabalho efetuado, referem-se as principais conclusões obtidas e apresenta-se uma lista de recomendações a implementar na Unidade de Produtos Metálicos do LNEC-EM com vista a melhorar a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios de tração. Por último, apresentam-se algumas ideias e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

Finalmente, no Capítulo 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS listam-se os diversos documentos estudados e referidos ao longo do documento.

2

Estudo Bibliográfico

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente Capítulo referem-se os principais conceitos que permitem compreender o comportamento dos aços que dão origem aos varões para betão que são objeto deste estudo.

As secções que se seguem baseiam-se em grande parte no trabalho desenvolvido na década de 80 (Seabra, A., 1981) e em dois estudos mais recentes (Smith, W., 1998) e (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

2.2. CONCEITOS DE METALURGIA

2.2.1. ESTRUTURA ATÓMICA

A energia e a posição dos eletrões de ligação determinam o arranjo atómico nos materiais e o tipo de ligação entre os átomos: forte ou fraca, direcional ou não direcional. Uma diminuição pronunciada da energia dos eletrões dá lugar à ligação forte ou primária. Para as ligações primárias podem definir-se três casos limite: a ligação iónica, a ligação covalente e a ligação metálica, distinguindo-se umas das outras pelo modo como os eletrões de ligação se distribuem (Seabra, A., 1981).

Os metais são constituídos por átomos e as suas propriedades são função da estrutura atómica que rege as forças de ligação entre os átomos.

Uma vez que a ligação entre os átomos de um aço é metálica, na presente Dissertação apenas se refere este modelo de ligação.

2.2.2. LIGAÇÕES METÁLICAS

Numa ligação metálica os eletrões de valência não pertencem a um ião determinado, mas distribuem-se uniformemente por toda a massa metálica e encontram-se em equilíbrio eletrostático com os iões positivos. Esta dependência dos eletrões dá à ligação metálica um carácter não-direcional ao contrário da ligação covalente. A ligação metálica confere aos metais as seguintes propriedades: opacidade à luz, refletividade, elevada condutividade elétrica e térmica, aumento da resistividade com a temperatura e possibilidade de deformação plástica em maior ou menor grau (Seabra, A., 1981).

2.2.2.1. Estrutura cristalina da ligação metálica

Os fatores que determinam o estado físico (sólido, líquido e gasoso) são a natureza das ligações, a temperatura e a pressão.

No caso da ligação metálica o arranjo depende do tamanho dos átomos e das forças mútuas de interação. O arranjo de átomos pode ser representado geometricamente como um poliedro de coordenação decorrente da ligação dos centros de todos os átomos vizinhos ou iões que tocam um átomo central. Portanto, a estrutura de um sólido pode ser descrita como um empilhamento atômico (Seabra, A., 1981).

A natureza da ligação metálica permite que as forças eletrostáticas possam ir atuando entre os diversos átomos, formando-se um agregado compacto e estável, dado que cada átomo é atraído de igual forma pelos seus vizinhos mais próximos por intermédio dos eletrões livres que passam entre eles. Desta forma, há a tendência de cada átomo se rodear do maior número de átomos vizinhos possível, sendo esta tendência apenas limitada pelas condições geométricas que se encontram envolvidas. Portanto, pode imaginar-se que os metais são formados por esferas duras empilhadas que obedecem a regras geométricas ditadas pela diferença de tamanho dos átomos e que se entregam numa rede regular a três dimensões, isto é, uma estrutura cristalina (Figura 1).

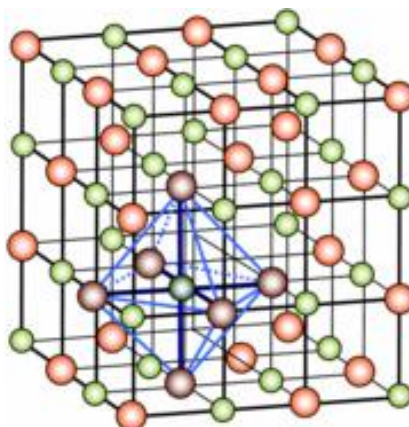


Figura 1 - Estrutura cristalina da ligação metálica (Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

Geometricamente, o número máximo de esferas idênticas que se podem empilhar à volta de uma esfera central, de modo que todas a toquem ao conjuntamente, é igual a doze. Nos produtos metálicos encontram-se dois arranjos deste tipo, os quais embora correspondam a um volume mínimo, não são equivalentes: (i) o hexagonal compacto (HC) e (ii) o cúbico de faces centradas (CFC). Os metais de transição possuem uma estrutura menos compacta, a cúbica de corpo centrado (CCC) (Figura 2).

Por outro lado, a estrutura CFC possui quatro famílias de planos paralelos de empilhamento compacto, os planos do octaedro. Assim, há a possibilidade de escorregamento nos planos do octaedro segundo uma daquelas direções, o que dá origem a doze sistemas de escorregamento. Portanto, os metais que cristalizam nesta estrutura possuem várias possibilidades de escorregamento e, conseqüentemente, apresentam uma grande aptidão à deformação plástica.

Por outro lado, a estrutura HC apresenta apenas três sistemas de escorregamento, o que torna muito mais limitada a deformação plástica dos metais que cristalizam nesta estrutura.

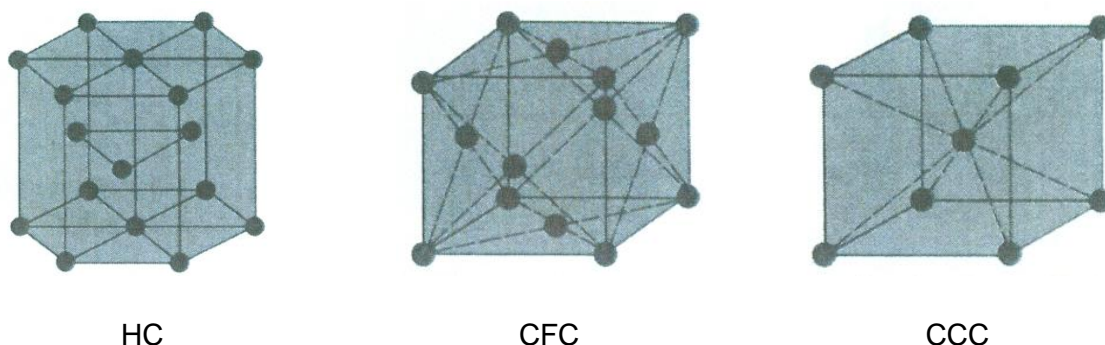


Figura 2 - Estruturas atômicas da ligação metálica (Smith, W., 1998)

As ligas ferro-carbono e o ferro são metais polimorfos, ou seja, podem cristalizar em mais do que um tipo de rede cristalina consoante a temperatura e a pressão a que se encontram, dando-se a mudança da estrutura cristalina bruscamente a determinada temperatura. Assim, diz-se que há alotropia ou que se deu uma transformação alotrópica, e as respetivas temperaturas chamam-se temperaturas críticas ou pontos de transformação.

O ferro apresenta uma rede CCC até à temperatura de 912 °C e a partir desta temperatura até 1394 °C cristaliza na estrutura CFC, sofrendo uma nova transformação a esta temperatura para o primeiro tipo de rede até ao ponto de fusão, 1538 °C.

Contudo existem muitos fatores que podem modificar as temperaturas a que se dão as mudanças de estrutura cristalina, sendo as mais importantes a pressão e a adição de outros elementos. Este último fator permite, de um modo geral, diminuir a temperatura e a velocidade de transformação (Seabra, A., 1981).

As transformações alotrópicas apresentam como vantagens a diminuição do tamanho do grão, a supressão das anisotropias de cristalização e redistribuição de impurezas. A principal desvantagem está associada à variação dimensional da malha cristalina.

Na realidade, um metal não é constituído apenas por um cristal, mas por vários cristais ou grãos. A massa metálica é policristalina e o seu arranjo depende do tipo de metal, do processo de fabrico e de eventuais tratamentos posteriores.

Os grãos desenvolvem-se a partir de embriões e aumentam em todas as direções, até fases de crescimento se encontrarem e formarem juntas de grão. O crescimento dos grãos depende do estado de deformação imposto ao material, sendo tanto maior quanto menor for a deformação. Alguns materiais como o alumínio e o níquel retardam o crescimento do grão, ao contrário do fósforo e do silício. A diminuição do tamanho do grão aumenta o módulo de elasticidade, a tensão limite de proporcionalidade e a resiliência do material.

O tamanho do grão muda também com a temperatura e o período de tempo durante o qual essa temperatura é mantida. Este facto é aproveitado nos tratamentos térmicos aplicados

numa peça deformada a frio. Quando um metal sofre uma deformação plástica a frio ocorre modificação da estrutura e alteração das características mecânicas e físicas, os seus grãos estão distorcidos e existe uma quantidade significativa de defeitos estruturais, principalmente lineares. Porém, é possível a estrutura recuperar através de tratamentos térmicos. As modificações da estrutura são progressivas e por esse motivo, durante a elevação da temperatura podem distinguir-se 2 fases:

- Recuperação - esta fase processa-se a temperaturas relativamente baixas, cerca de 10% a 30% da temperatura de fusão. Ocorrem alterações que conduzem à redução do número de defeitos estruturais e reajustes internos para configurações mais estáveis. Uma aplicação importante do fenómeno de recuperação é o tratamento térmico designado por tratamento de redução ou de relaxação de tensões.
- Recristalização – esta fase caracteriza-se pela substituição da textura existente devida aos grãos deformados por uma nova textura de grãos finos, não deformados. A orientação do crescimento dos novos grãos é condicionada pelas direções da textura antiga. Existe portanto uma certa anisotropia nas propriedades, que pode ser reduzida através da adição de elementos de liga, que reduzem a velocidade de transformação e a temperatura de recristalização. A temperatura de recristalização serve para definir a deformação a quente e a deformação a frio, consoante esta se dê acima ou abaixo da temperatura de recristalização. Como a estrutura que se forma durante a recristalização é idêntica à que existia antes da deformação a frio, esta é utilizada para melhorar a ductilidade do material após deformação a frio.

2.2.3. DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO

A análise de ligas metálicas (materiais com propriedades metálicas que contêm dois ou mais elementos químicos sendo que pelo menos um deles é metal) exige também o conhecimento relativo aos vários estados de equilíbrio que se processam durante e após a solidificação, do que resulta o estabelecimento do diagrama de equilíbrio físico-químico para cada sistema de ligas. Um diagrama deste tipo reúne o diagrama de solidificação e o diagrama dos estados de equilíbrio das transformações no estado sólido e dá indicações sobre o número de fases presentes, a composição química e a proporção de cada fase em equilíbrio com o ambiente em função da temperatura, pressão e composição total da liga. Os diagramas de equilíbrio permitem ainda conhecer os pontos críticos e transformações alotrópicas (Seabra, A., 1981).

Naturalmente, os diagramas de equilíbrio (Figura 3) tornaram-se, tanto ao nível teórico como prático, um elemento essencial visto que permitem a previsão do comportamento de metais e das suas ligas durante operações como fusão, tratamentos térmicos e mecânicos.

A liga binária ferro-carbono apresenta um ponto, denominado ponto eutético, que corresponde ao ponto de fusão mais baixo do sistema de ligas possíveis.

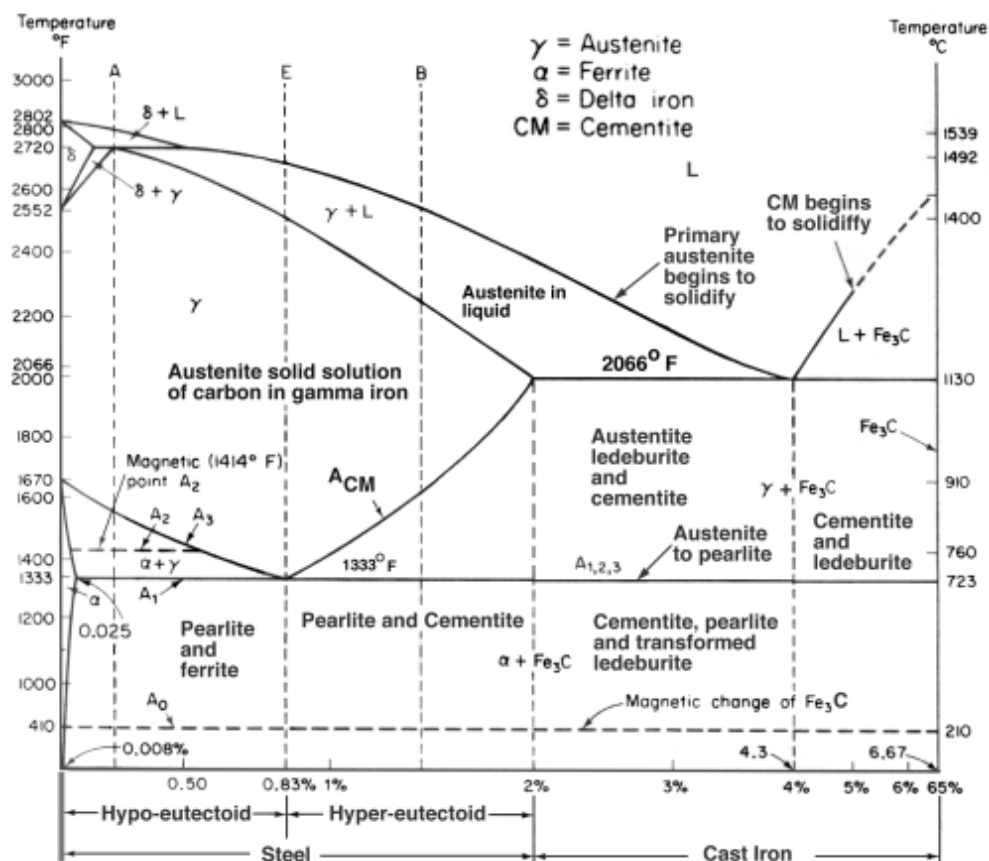


Figura 3 - Diagrama de equilíbrio da liga ferro-carbono (Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

2.2.4. SOLIDIFICAÇÃO

Embora existam vários processos para obter metais no estado sólido, a fusão de determinadas matérias-primas seguida de solidificação continua a ser o processo mais utilizado para obter os metais e as ligas correntemente usados (Smith, W., 1998).

O processo de solidificação deve ser bem delineado, para evitar que ocorram heterogeneidades químicas (segregações, devidas a diferenças de pontos de fusão entre os materiais constituintes da liga) e físicas (descontinuidades, devidas a gradientes de temperatura na peça solidificada). Um dos maiores problemas é a presença de oxigénio e hidrogénio. Durante a solidificação, a solubilidade destes gases pode diminuir bruscamente originando o aparecimento de bolhas no interior do lingote ou de fissuras internas. O tratamento mais comum é a adição de elementos desoxidantes como o alumínio. Quando esta solução é empregue o aço praticamente não tem bolhas e define-se “calmado”. Caso contrário, chama-se “efervescente” (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

2.2.5. LIGAS FERRO-CARBONO

O ferro apresenta uma rede CCC (ferro α) até à temperatura de 912 °C e a partir desta temperatura até 1394 °C cristaliza na CFC (ferro γ), sofrendo nova transformação (ferro δ) a esta temperatura para o primeiro tipo de rede até ao ponto de fusão, 1538 °C (Seabra, A., 1981).

A transformação A 4 (ferro δ para ferro γ) corresponde a uma importante contração de volume, e a transformação A 3 (ferro γ para ferro α) corresponde a uma importante dilatação da malha cristalina (Figura 3).

O carbono, consoante a percentagem existente, altera os pontos de transformação alotrópica do ferro: A 4, A 3 e o ponto de fusão.

As microestruturas que se podem obter num aço com um dado teor de carbono são muito diversificadas, como a austenite (CFC, dúctil), ferrite (aço macio), cementite (dura, frágil), perlite (mais dura que a ferrite), bainite (formada a partir da austenite por via de um arrefecimento rápido, é mais dura e dúctil que a perlite) e martensite (muito dura, muito frágil).

2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE AÇO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO EM BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO

O termo aço é a definição genérica usada para as ligas de ferro-carbono com teores de carbono de 0,008% a 2,11%, que possuem outros elementos residuais devido ao processo de produção e que podem conter, adicionalmente, outros elementos de liga (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

Os produtos de aço utilizados nos elementos de betão armado e pré-esforçado são obtidos pela metalurgia do aço a que se dá o nome de siderurgia. Nesta secção descreve-se o processo relativo à produção destes materiais: a produção siderúrgica.

O ferro, como a maior parte dos metais, é extraído dos minérios por meio de reações de redução, obtidas através da ação do carbono sob a forma de carvão. Na natureza estes minérios não aparecem puros; contêm ganga, isto é, impurezas que podem ser metais alcalinos, cálcio, alumínio, enxofre, fósforo, etc.

Basicamente existem dois processos de produção de ferro ou de ligas ferro-carbono: os altos-fornos (BF) com convertidores (BOF) e os fornos de arco elétrico (EAF).

2.3.1. PROCESSO DE FABRICO DE PRODUTOS DE AÇO

2.3.1.1. Altos-fornos (BF) com Convertidores (BOF)

Através deste processo, pretende-se reduzir quimicamente e converter fisicamente óxidos de ferro em ferro liquefeito, a partir de minério de ferro (Hematite ou Magnetite com percentagens entre 50 a 70 % de ferro), coque e cal colocados no alto-forno, em combinação com a introdução de ar pré-aquecido na câmara de aço com revestimento cerâmico do alto-forno (Figura 4) (GASIN, 2015).

O coque funciona como combustível e agente redutor que se combina com o oxigénio do minério transformando-se em monóxido e dióxido de carbono, sob a forma gasosa, libertando o ferro metálico. O coque, que possui 90 a 93 % de carbono, é normalmente produzido na própria siderurgia, através da queima parcial do carvão mineral. Este processo é necessário para remover o material volátil do carvão e, assim, aumentar sua resistência mecânica de forma a suportar a carga de minério e calcário.

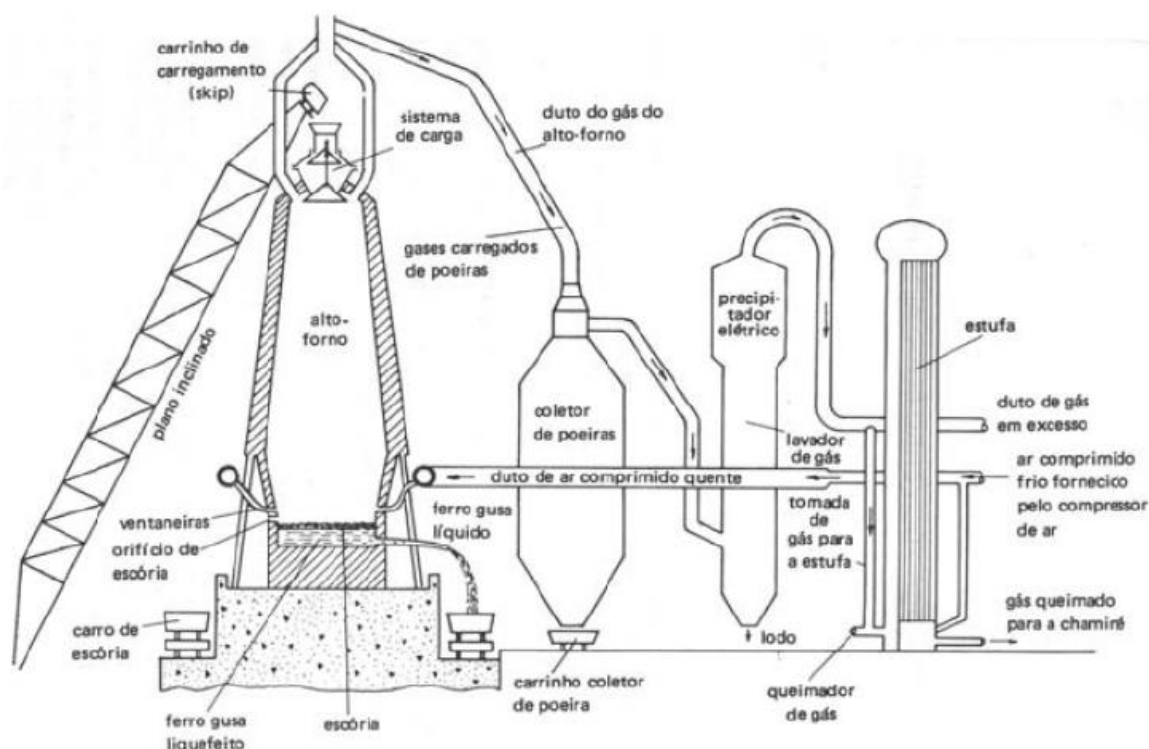


Figura 4 - Esquema representativo do funcionamento do Alto-forno (Rocha, J., 2009)

A cal destina-se a libertar o minério das suas impurezas, reagindo com os seus componentes principais, como a sílica e a alumina, para formar a escória.

Ao ferro que sai do alto-forno chama-se gusa e este produto é inaplicável como material de construção, pois a percentagem de carbono existente na gusa pode atingir valores da ordem dos 4 a 4,5%. Este facto faz com que a gusa seja um material frágil, de difícil trabalhabilidade. Um outro subproduto que se obtém é a escória de alto-forno.

É necessário recorrer a processos de tratamento da gusa, para fabricar ferro e ligas de ferro-carbono com características que permitam o seu uso no sector da construção.

Um dos métodos que se pode recorrer para produzir aço a partir dos produtos vindos do alto-forno é a utilização de convertidores. A gusa, com adição de sucata, é convertida em aço através da introdução de oxigénio puro a alta velocidade de forma a diminuir a percentagem de carbono e impurezas da gusa.

Nos países com fácil acesso ao minério, usam-se sobretudo altos-fornos com convertidores para a produção dos aços utilizados na construção. Em países em que isso não acontece, recorre-se a fornos de arco elétrico.

2.3.1.2. Fornos de arco elétrico (EAF)

Um outro método que permite transformar a gusa numa liga ferro-carbono passa pela utilização de fornos de arco elétrico (Figura 5), nos quais o coque é substituído por eletricidade para produzir calor suficiente para derreter a gusa ou o aço (GASIN, 2015).

Este é o método mais eficaz para produzir aços de alta qualidade. Os processos de refinamento ocorrem numa câmara, onde as condições de temperatura são controladas automaticamente por computador.

Nos dias de hoje, a carga mais utilizada é sucata, com adição de cal e minério de ferro.

Na fase inicial insere-se oxigénio puro para aumentar a temperatura e acelerar o processo de purificação da sucata. Posteriormente, os elétrodos de grafite são colocados em posição e a corrente elétrica é acionada num dos elétrodos. A corrente flui ao longo da carga de metal e passa através de arco elétrico para os outros elétrodos. Com este processo atingem-se rapidamente altas temperaturas e o metal facilmente se funde.

No final do processo de purificação do aço, é possível executar ajustamentos à composição da liga através de adições de elementos como o silício, o manganês, o vanádio, o molibdénio e o crómio, para cumprir os requisitos do cliente.

Atualmente nas unidades industriais modernas que produzem varões, após a produção do aço este é vazado de forma contínua para um molde refrigerado. De seguida o aço fundido é vertido em biletas que são refrigerados, assegurando ao mesmo tempo a sua laminagem e a solidificação. No fim do processo, o bilite é endireitado e cortado nas dimensões pretendidas. O produto semi-acabado é transportado para o forno de laminagem para obtenção dos produtos finais. Este processo designado de vazamento contínuo é muito mais eficaz do que o anterior, que consistia em vazar o aço produzindo-se lingotes que posteriormente eram laminados.

No caso de aços de baixa liga e dos aços ligados (aços-carbono), de um modo geral, são utilizadas as seguintes fases de processamento: decapagem química; laminagem para redução da espessura; recozimento ou tratamento térmico para regenerar a estrutura cristalina; laminagem de encruamento superficial (passe de têmpera) ou laminagem superficial a frio das bandas recozidas para lhes conferir as propriedades mecânicas mas também a forma, a rugosidade de superfície desejada e o acabamento final.

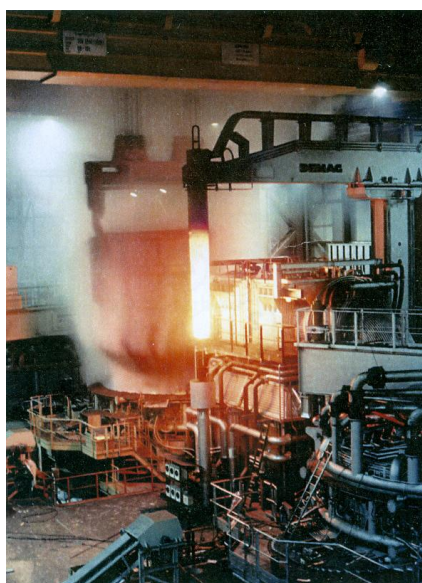


Figura 5 - Forno de arco elétrico (Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

2.3.2. TIPOS DE PRODUTOS DE AÇO

As principais diferenças entre os produtos finais provenientes de cada um dos processos acima mencionados estão associadas à matéria-prima utilizada. No forno de arco elétrico, como se usa sucata, os aços contêm maiores percentagens de elementos residuais como o cobre, o níquel e o nitrogénio. Por outro lado, os aços produzidos por alto forno com convertidor possuem menores concentrações de enxofre, fósforo e nitrogénio, devido ao efeito de refinamento provocado pela injeção de oxigénio no convertidor (Relatório 331 - DE/NCE, 2009). No Quadro 1 apresentam-se as composições químicas típicas dos aços provenientes de cada processo de fabrico.

Quadro 1 - Composição química dos aços (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

Processo	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	N
BOF	0,20	0,80	0,15	0,01	0,005	0,03	0,02	0,02	0,01	0,010	0,006
EAF	0,20	0,80	0,15	0,03	0,02	0,30	0,15	0,15	0,05	0,025	0,010

O aço fundido proveniente destes dois tipos de fornos é depois vazado em billetes, chapas e blocos ou tarugos, por via de um sistema de vazamento contínuo ou por via de transformação de lingotes.

Estes produtos são a matéria-prima de outros processos produtivos como, por exemplo, a laminagem a quente. Neste processo, a forma, a dimensão e as propriedades metalúrgicas do aço são modificadas por compressão repetida do metal a quente (± 1150 °C) entre cilindros de laminagem acionados eletricamente, até se obter o perfil e as dimensões desejados. O aço que entra no processo de laminagem a quente varia em forma e perfil em função do produto que se pretende fabricar. Os produtos obtidos por laminagem a quente classificam-se normalmente em dois tipos básicos, em função da sua forma: os produtos planos e os produtos longos (varões ou perfis).

Outro processo produtivo que existe é a laminagem a frio, no qual as propriedades dos produtos laminados a quente (bobines), como sejam a espessura e as características mecânicas e tecnológicas, são alteradas por compressão entre cilindros de laminagem, sem um aquecimento prévio do material que entra no processo. O material que entra no processo é fornecido sob a forma de bobines. As fases de processamento e a sua sequência num trem de laminagem a frio dependem da qualidade do aço tratado (varões endurecidos a frio) (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

Os produtos laminados a quente ou laminados a frio podem ser submetidos a tratamentos térmicos ou mecânicos como forma de alterar as suas características mecânicas.

2.3.2.1. Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos têm um interesse especial nos aços com microestruturas constituídas essencialmente de martensite ou bainite.

Nestes aços é conveniente adicionar elementos como o níquel e o manganês que permitem diminuir a temperatura abaixo da qual a transformação de austenite para martensite ou bainite pode ocorrer. Estes elementos promovem a estabilização da austenite a temperaturas baixas, aumentando o ponto A₄ e baixando o ponto A₃, o que significa que, a temperatura a partir da qual se realiza a têmpera e retardam a transformação de austenite em perlite (CETNO, 2003/04).

Os tratamentos térmicos (Relatório 331 - DE/NCE, 2009) que mais se destacam são:

- **Recozimento** – este tratamento térmico consiste no aquecimento e na manutenção de uma temperatura determinada (temperatura de recozimento), seguido de arrefecimento lento no domínio de transformação perlítica. Pretende-se assim restituir ao material as características que foram alteradas por tratamento mecânico ou térmico anterior, regularizar as estruturas brutas de fusão, obter estruturas favoráveis à maquinaria ou deformação a frio, atenuar heterogeneidades ou, ainda eliminar ou reduzir tensões internas. O recozimento isotérmico permite diminuir consideravelmente o tempo do ciclo de recozimento e obter uma microestrutura final mais bem definida.
- **Têmpera** – esta designação inclui uma série de tratamentos térmicos, mais ou menos diferentes, cuja finalidade é passar de estruturas do domínio austenítico para estruturas do domínio bainítico ou do domínio martensítico, que conferem ao material características mecânicas elevadas. Para que se obtenha uma estrutura de têmpera torna-se necessário que a peça seja arrefecida a uma velocidade igual ou superior à velocidade crítica de têmpera, que se define como a velocidade a partir da qual se evita a transformação da austenite no domínio perlítico. Para minimizar o aparecimento de tensões internas elevadas, devido à contração da microestrutura e do gradiente de temperatura, recorre-se à têmpera por etapas. Este tratamento origina um material muito duro e muito frágil.
- **Revenido** – neste tratamento, que se deve realizar logo a seguir à têmpera, eleva-se a temperatura até à temperatura de recristalização. Este procedimento permite eliminar a maioria dos inconvenientes da têmpera, aliviando as tensões internas, corrigindo durezas excessivas e a fragilidade do material.
- **Tempcore** – com este processo, o produto final, em geral com teor de carbono reduzido (0,20%), é sujeito a um arrefecimento superficial de duração curta na caixa de arrefecimento. Como consequência, a superfície do produto fica mais resistente, mas não excessivamente frágil dado que o calor do núcleo aquece novamente a superfície. De seguida o produto é deixado a arrefecer à temperatura ambiente. O produto final ganha resistência e fica com características mecânicas diferentes na camada superficial (martensite) e na camada interior (ferrite-perlite)

Atualmente os aços laminados a quente existentes no mercado são obtidos através do processo *Tempcore*.

2.3.2.2. Tratamentos mecânicos

Os tratamentos mecânicos, também designados por “tratamentos a frio”, são os processos mais utilizados para modificar as propriedades mecânicas dos aços, nomeadamente as tensões limite convencional de proporcionalidade ou de cedência e o alongamento na rotura.

É necessário que, após o tratamento mecânico, o material seja deixado em repouso durante algum tempo, para que ocorram um conjunto de transformações na estrutura interna do aço que se designam por “envelhecimento” (Relatório 331 - DE/NCE, 2009). Os tratamentos mecânicos mais comuns são a trefilagem e a estiragem (Figura 6).

A trefilagem é um processo pelo qual o fio-máquina ou fio metálico é redimensionado ao ser estirado através de aberturas cónicas, de menor secção transversal, chamadas matrizes. O material que entra no processo é geralmente constituído por fio-máquina com diâmetros que vão de 5,5 a 16 mm, obtidos a partir dos trens de laminagem a quente sob a forma de bobinas. Uma unidade de trefilagem possui, em geral, as seguintes linhas de processamento:

- Pré-tratamento do fio-máquina (remoção mecânica de calamina, decapagem química);
- Trefilagem por via seca ou húmida (geralmente em várias passagens utilizando fieiras com dimensões cada vez menores);
- Tratamento térmico (recozimento contínuo/descontínuo e têmpera em óleo);
- Acabamento.

Relativamente à estiragem, este processo consiste na aplicação de tração às barras ou fios. O inconveniente deste tratamento é que os fios ou barras não ficam homogêneos, tanto em dimensões como no alongamento que sofreram, pois há locais que cedem mais do que outros, provocando variações na secção.



Figura 6 - Tratamento mecânico (Fapricela, 2015)

2.3.3. PROCESSO DE FABRICO DE PRODUTOS DE AÇO PARA BETÃO

2.3.3.1. Fabrico de varões laminados a quente

Na laminagem a quente, a dimensão, a forma e as propriedades metalúrgicas do aço são modificadas por compressão (e estiramento) repetida do metal quente (a temperatura pode ir a ± 1150 °C) entre cilindros de laminagem acionados eletricamente, até se obter o perfil e dimensão desejados. O aço que entra no processo de laminagem a quente varia em forma e perfil – lingotes vazados, brames, blumes, billetes, perfis estampados – em função do

produto que se pretende fabricar. Os produtos obtidos por laminagem a quente classificam-se normalmente em dois tipos básicos, em função da sua forma: produtos planos e produtos longos. É o processo utilizado para se obter os varões de aço para betão armado.

Atualmente nas unidades industriais que produzem varões de aço, o material é vazado de uma forma contínua (Figura 7) para um molde refrigerado, sendo transformado em biletas que são posteriormente refrigerados, garantindo ao mesmo tempo a sua laminagem e solidificação. No fim do processo, o bilite é endireitado e cortado nas dimensões desejadas. O produto semi-acabado é então transportado para o forno de laminagem, a uma temperatura de ± 1150 °C, para aquisição dos produtos finais (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).



Figura 7 - Vazado de forma contínua (Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

No forno de laminagem, o fabrico de varões de aço implica as seguintes fases de processamento: decapagem química, laminagem para redução da espessura (o bilite vai passando por rolos que modelam a forma da secção até se obter as dimensões pretendidas), recozimento ou tratamento térmico para regenerar a estrutura cristalina, laminagem de encruamento superficial ou laminagem superficial a frio das bandas recozidas e, por fim, o acabamento final.

Porém, o tipo de tratamento térmico que apresenta uma melhor relação qualidade/preço é o processo *Tempcore*, pois permite a produção de aços soldáveis de alta ductilidade, sem necessidade de adição dispendiosa de elementos de liga.

Caso se pretenda um produto nervurado, as nervuras dos varões de aço para betão armado são introduzidas pelo último rolo de laminagem, através de moldes com o perfil predefinido.

Por fim, o material produzido é cortado para se obter o comprimento desejado (Figura 8a), agrupado por vazamento e etiquetado para distribuição. Em algumas unidades fabris, para se facilitar a automatização do processo de produção, o produto pode ser fornecido em rolos, até 20 mm de diâmetro.

O material em rolo (Figura 8b) tem que ser posteriormente endireitado para poder ser aplicado na indústria da construção. O processo de endireitamento consiste na aplicação de uma curvatura de sinal contrário à existente devido à criação do rolo, através de vários métodos. Independentemente do método utilizado é preciso ter em conta que o processo de endireitamento provoca alterações nas características mecânicas dos produtos (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

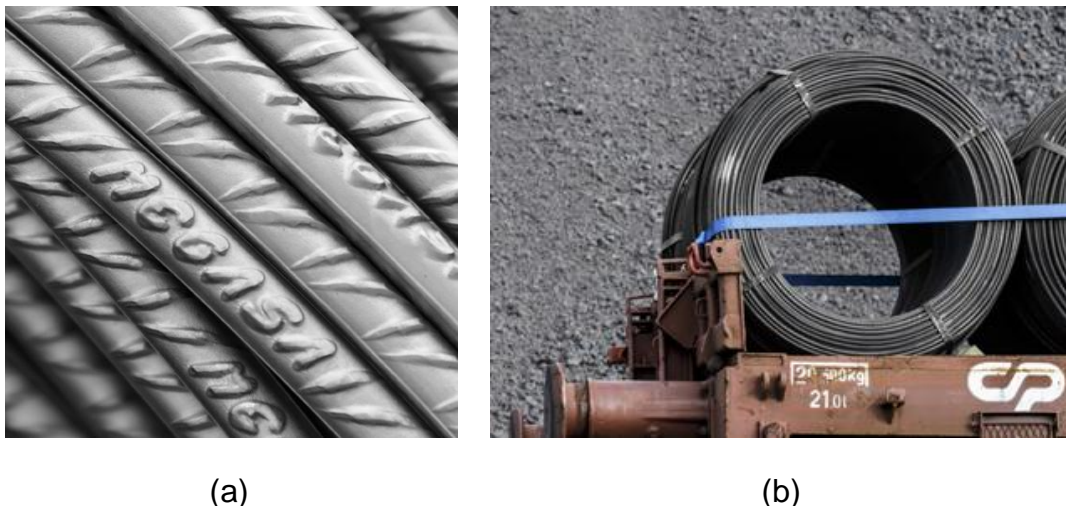


Figura 8 - Varões laminados a quente: (a) produto reto; (b) produto em rolo (Megasa, 2015)

2.3.3.2. Fabrico de varões laminados a frio

Na laminagem a frio, as propriedades dos produtos laminados a quente, como sejam a espessura e as características mecânicas e tecnológicas, são alteradas por compressão entre cilindros de laminagem sem um aquecimento prévio do material que entra no processo. O material que entra no processo é obtido na forma de bobinas provenientes dos trens de laminagem a quente. As fases de processamento e a sequência do processamento num trem de laminagem a frio dependem da qualidade do aço tratado.

O processo de fabrico de varões laminados a frio é idêntico ao processo de fabrico de varões laminados a quente até aos tratamentos térmicos finais.

A composição química dos produtos de aço laminados a frio é ligeiramente diferente da dos aços de produtos laminados a quente, pois os produtos endurecidos a frio possuem uma menor percentagem de carbono.

Como consequência, os aços endurecidos a frio apresentam uma menor resistência à tração que os aços obtidos por laminagem a quente. Esta diferença é compensada através da laminagem a frio que aumenta as tensões mas reduz significativamente a ductilidade dos aços.

Após o endurecimento a frio, é recomendável que os varões de aço sejam sujeitos a um tratamento térmico para permitir o desaparecimento de tensões internas (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

2.3.3.3. Fabrico de redes eletrossoldadas

Os produtos provenientes da laminagem a quente ou do endurecimento a frio podem ser cortados e soldados entre si formando painéis ou rolos de malha/rede eletrossoldada.

As redes eletrossoldadas (Figura 9) são constituídas por varões de superfície lisa ou nervurada ou fios de aço. Os varões ou fios são dispostos em malha ortogonal, sendo as ligações entre elas efetuadas em todos os pontos de cruzamento através de soldadura por resistência elétrica (por pontos) automática.

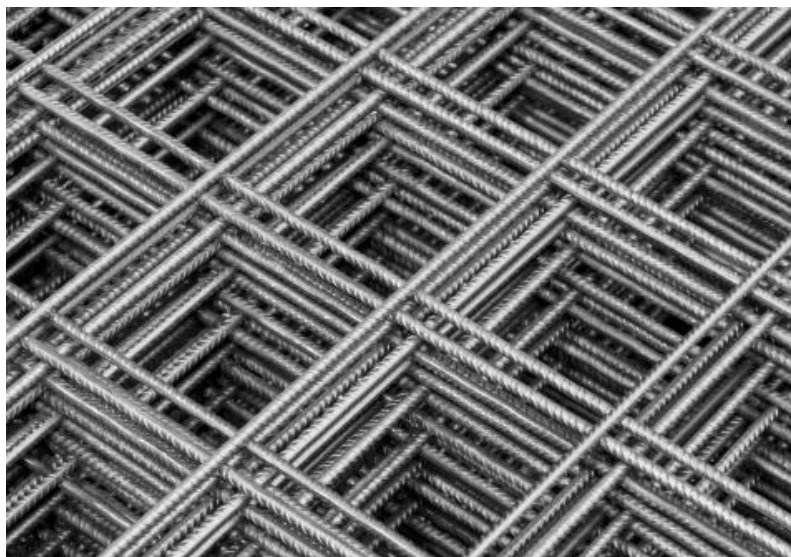


Figura 9 - Redes eletrossoldadas (Megasa, 2015)

2.3.3.4. Fabrico de produtos de aço para pré-esforço

O processo de fabrico de produtos de aço para pré-esforço (fio, cordões e varões para pré-esforço) é semelhante ao processo de fabrico de varões de aço para betão armado até à laminagem a quente. No final da laminagem a quente os produtos de aço para pré-esforço são submetidos a um arrefecimento acelerado (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

Até esta fase, as diferenças da resistência e ductilidade entre os aços de armaduras e para pré-esforço devem-se, praticamente, a diferenças na composição química de cada um deles. Posteriormente, existe um conjunto de processos que podem ser utilizados: tratamentos térmicos e tratamento mecânico (trefilagem).

Para a produção de varões de pré-esforço, os produtos semi-acabados provenientes da laminagem a quente, são aquecidos até uma temperatura de cerca de 1000 °C, de modo a obter uma microestrutura homogênea de austenite, sendo depois submetidos a uma têmpera por submersão num banho de óleo. Nesta última fase, a microestrutura é transformada em martensite. Para se obter um material menos frágil é necessário proceder a um tratamento por revenido (alteração da têmpera), aquecendo o produto, por algum tempo, até à temperatura de ± 550 °C. Desta forma consegue-se a difusão parcial do carbono da martensite, diminuindo as tensões internas e obtém-se um material com maior deformabilidade à custa de uma pequena redução da resistência e da dureza do material.

Os fios para pré-esforço, normalmente, são obtidos por trefilagem de fio-máquina. Após a trefilagem, os fios são submetidos a um tratamento de estabilização que combina um tratamento térmico a 400 °C e um estiramento até uma extensão de 1%. Este processo permite produzir fios para pré-esforço com baixa relaxação e melhores características mecânicas.

2.3.3.5. Produtos de aço para betão armado

Nesta secção apresenta-se o enquadramento relativo à utilização em Portugal dos aços para armaduras de betão armado. Considerando que esta atividade é regulada pelo REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, Decreto-Lei n.º 349-C/83, de 30 de julho (Decreto-Lei n.º 349-C, 1983), onde são especificados os tipos de armaduras e as suas principais características e que este regulamento estipula, no seu artigo 23º, a obrigatoriedade da classificação prévia pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil destes produtos, esta secção baseia-se na publicação do LNEC intitulada Lista de Documentos de Classificação de aços para armaduras de betão armado em vigor em Portugal (LNEC, 2015).

A partir de 1998 foram sendo publicadas várias Especificações LNEC para armaduras de betão armado, com as quais foram uniformizadas e atualizadas as condições a que os diversos tipos de armaduras devem satisfazer com vista à sua classificação.

Estes documentos especificam, à luz dos conhecimentos e exigências atuais, as condições a que os varões das armaduras devem satisfazer com vista ao cumprimento do REBAP (Decreto-Lei n.º 349-C, 1983) mas também outras disposições, nomeadamente, exigências de ductilidade, de soldabilidade e de resistência à fadiga, assim como as características geométricas das nervuras no caso de varões classificados como de alta aderência. Apresentam ainda o código de identificação do fabricante e do país de origem.

Os Documentos de Classificação elaborados pelo LNEC ao abrigo do REBAP (Decreto-Lei n.º 349-C, 1983), além de comprovarem a satisfação das características especificadas para o tipo de armaduras em questão, descrevem a geometria das nervuras, indicam a gama de fabrico e especificam o modo de identificação das armaduras. Salienta-se que não são objeto de Documentos de Classificação as redes eletrossoldadas de pequeno diâmetro (inferior ou igual a 4,5 mm), pois estes produtos são considerados como armaduras secundárias, cuja função é basicamente a de limitar a fendilhação do betão.

Refira-se ainda que, de acordo com o Decreto-Lei n.º 390/07 de 10 de dezembro (Decreto-Lei n.º 390, 2007), que revogou o Decreto-Lei n.º 128/99 de 21 de abril (Decreto-Lei n.º 128, 1999), estão sujeitos a certificação obrigatória em Portugal os produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras em betão armado que se apresentem na forma de varões, barras, rolos ou bobinas, redes eletrossoldadas, treliças e fitas ou bandas denteadas, independentemente do processo tecnológico utilizado na sua obtenção (art.º 3.º do Decreto-Lei n.º 390, 2007), ou seja, todos os tipos de armaduras de aço para betão armado. Esta certificação deve ser concedida por um organismo acreditado pela entidade competente no domínio da acreditação em conformidade com as metodologias do Sistema Português da Qualidade (art.º 4.º do Decreto-Lei n.º 390, 2007).

Com o objetivo de convergir com a normalização europeia e respondendo às solicitações da indústria interessada, o LNEC procedeu à revisão das Especificações Técnicas E 449 de 2008, E 450 de 2008, E455 de 2008 e E460 de 2008, relativas aos varões de aço laminado a quente (Quadro 2).

Quadro 2 - Produtos de aço para armaduras de betão armado (Especificações LNEC, 2008, 2010, 2011 e 2012)

Especificação E 449	Varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
Especificação E 450	Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
Especificação E 455	Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
Especificação E 456	Varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
Especificação E 458	Redes eletrossoldadas para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
Especificação E 460	Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
Especificação E 478	Fios lisos de aço A500 EL. Campo de aplicação, características e ensaios.
Especificação E 479	Redes eletrossoldadas de pequeno diâmetro. Campo de aplicação, características e ensaios.
Especificação E 480	Treliças eletrossoldadas para armaduras de betão armado. Campo de aplicação, características e ensaios.

As alterações introduzidas nas novas versões de 2010 referem-se fundamentalmente à marcação dos varões para a sua identificação. Assim sendo, o início de marcação destes produtos passará a ser assinalado através do engrossamento de duas nervuras seguidas. Relativamente aos varões de aço endurecido a frio, o início de marcação manter-se-á inalterado. Ou seja, o início da identificação e o sentido de leitura é assinalado por duas nervuras normais entre duas engrossadas (ou omitidas) que se situará à esquerda do observador. A partir da segunda nervura engrossada (ou omitida) há um intervalo com um determinado número de nervuras normais que identifica o país e engrossa-se (ou omite-se) a nervura seguinte. A identificação de Portugal é feita através de um intervalo de sete nervuras normais. A seguir aparece a identificação do fabricante através de uma ou duas séries de nervuras normais entre uma ou duas nervuras engrossadas (ou omitidas), respetivamente.

Adicionalmente à alteração do código de início de marcação dos varões de aço laminado a quente, foram também alterados os códigos dos países de origem.

A identificação dos varões fornecidos em rolo é efetuada através de um código que consiste no engrossamento de uma nervura transversal na série de nervuras oposta à da identificação do fabricante e do país de origem.

No caso das redes ou das treliças eletrossoldadas, além da identificação dos varões antes referida, são também colocadas etiquetas indicando o seu fabricante e a designação do produto.

De modo a que os fabricantes se possam adaptar as condições de fabrico às novas marcações, e que seja escoado eventual produto armazenado, poderão ser comercializados e empregues nas construções de betão armado até 31 de dezembro de 2012, varões com a marcação que vigorava à data da introdução destas alterações.

Com vista a salvaguardar eventuais confusões que possam surgir no mercado durante este período transitório, o LNEC irá manter, na Lista dos Documentos de Classificação (LNEC, 2015) em vigor, a referência ao Documento e às marcações a substituir, em conjunto com a indicação do novo Documento de Classificação e das respetivas novas marcações.

Varões de aço

Os varões podem ser classificados consoante o tipo de aço, quanto à sua resistência, ductilidade e também pelas características de aderência. Em Portugal, no caso dos varões nervurados laminados a quente, existem duas classes de resistência, identificadas através do valor característico da tensão de cedência dos aços (400 MPa e 500 MPa) e de duas classes de ductilidade: ductilidade alta e ductilidade especial. No que respeita às características de aderência existem duas classes: alta e normal, consoante o varão apresente ou não nervuras transversais.

As diferentes combinações existentes são identificadas mediante diferentes configurações das nervuras transversais (Figura 10 a Figura 14).

No caso dos varões endurecidos a frio, existe só uma classe de resistência (500 MPa), tal como no caso dos varões lisos laminados a quente.

Assim, um aço de betão armado apresenta a seguinte denominação:

A – $f_{y,k}$ (MPa) – N ou E – R ou L – SD

em que:

$f_{y,k}$ representa o valor característico da tensão de cedência em MPa;

N ou E representa o processo de fabrico: laminado a quente (N) ou laminado a frio (E);

R ou L representa a condição da superfície: rugosa (R) ou lisa (L);

SD representa a ductilidade especial.

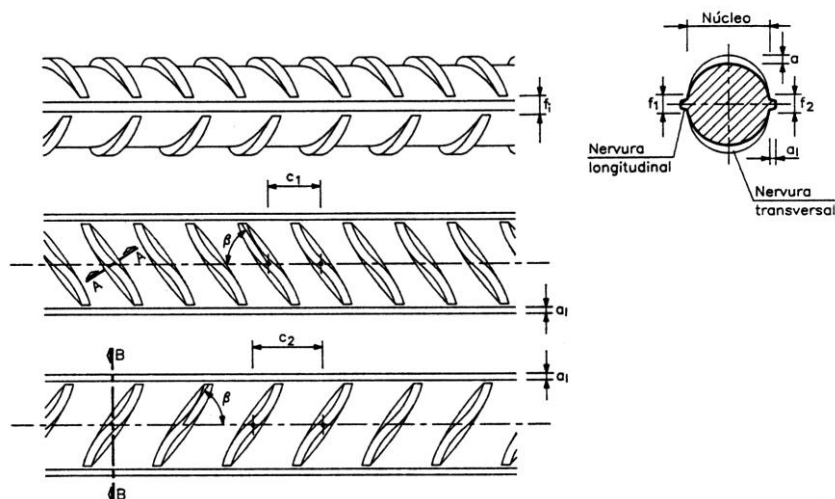


Figura 10 - Geometria das nervuras do aço do tipo A400 NR (Especificação E 449, 2010)

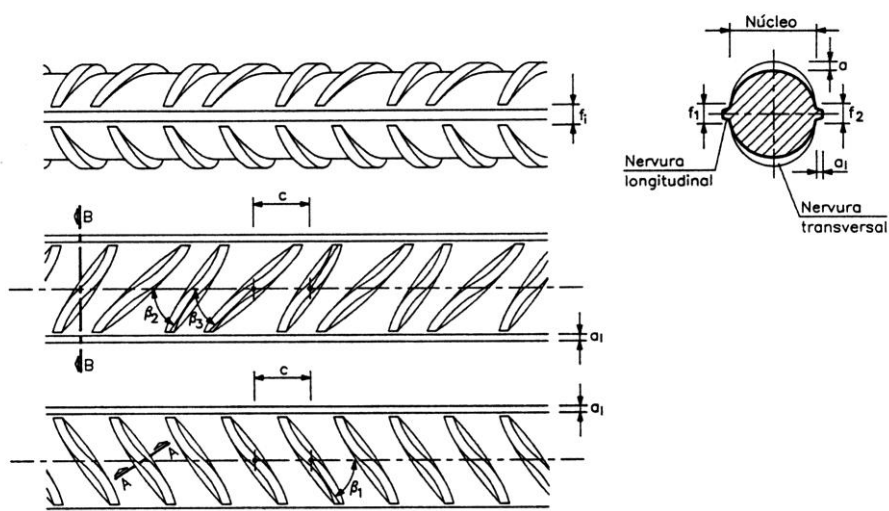


Figura 11 - Geometria das nervuras do aço do tipo A500 NR (Especificação E 450, 2010)

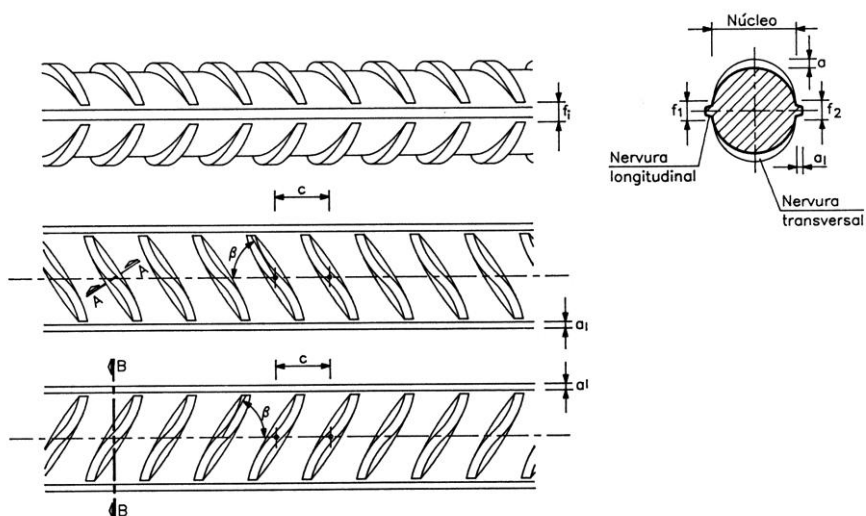


Figura 12 - Geometria das nervuras do aço do tipo A400 NR SD (Especificação E 455, 2010)

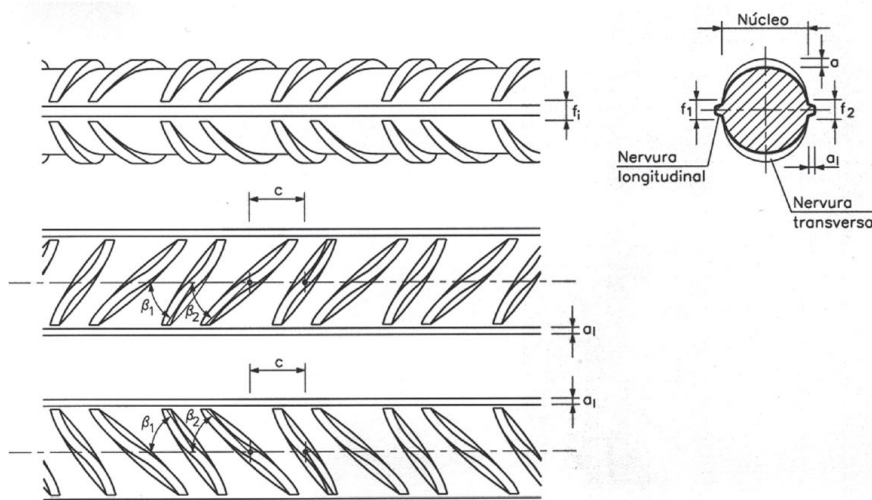


Figura 13 - Geometria das nervuras do aço do tipo A500 NR SD (Especificação E 460, 2010)

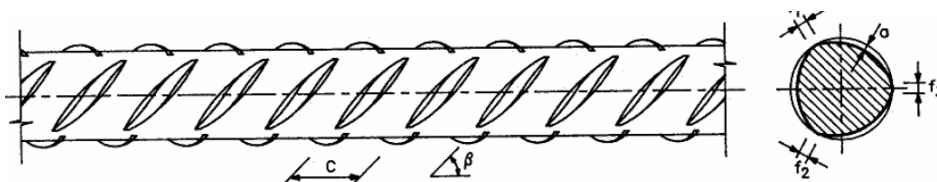


Figura 14 - Geometria das nervuras do aço do tipo A500 ER (Especificação E 456, 2011)

A identificação do país de origem e do fabricante é definida através de códigos estabelecidos por engrossamento ou omissão das nervuras transversais (Figura 15 e Quadro 3).

Desta forma, é fácil estabelecer equivalências entre os tipos de aço definidos nas Especificações LNEC com os definidos no Eurocódigo 2: o aço A500 ER corresponde a um aço de ductilidade A, os aços A400 NR e A500 NR correspondem a aços de ductilidade B, e por último, os aços A400 NR SD e A500 NR SD correspondem a aços de ductilidade C (NP EN 1992-1-1, 2012).

Em Portugal podem-se comercializar varões nervurados de 6 mm até 40 mm de diâmetro.

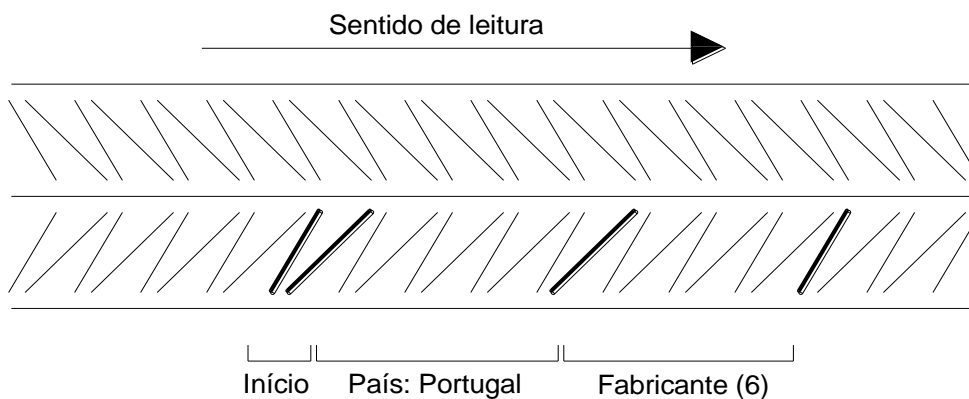


Figura 15 - Código de marcas de identificação dos varões nervurados (LNEC, 2015)

Quadro 3 - Identificação de acordo com o país de origem do produto (LNEC, 2015)

Países	N.º de nervuras normais
Áustria, Alemanha, Polónia, Republica Checa e Eslováquia	1
Bélgica, Holanda, Luxemburgo e Suíça	2
França e Hungria	3
Itália, Malta e Eslovénia	4
Reino Unido, Irlanda e Islândia	5
Dinamarca, Estónia, Finlândia, Letónia, Lituânia, Noruega e Suécia	6
Espanha e Portugal	7
Chipre e Grécia	8
Outros países	9

Redes eletrossoldadas

Existem dois tipos de produtos: as redes eletrossoldadas com utilização em betão estrutural e redes eletrossoldadas de pequeno diâmetro.

As redes eletrossoldadas apenas podem ser constituídas a partir de um único tipo de produto, embora os diâmetros e os espaçamentos possam ser diferentes na direção longitudinal e na direção transversal. As redes eletrossoldadas utilizadas em betão estrutural podem ser constituídas por varões nervurados, de 5 mm de diâmetro até 16 mm de diâmetro, laminados a quente ou laminados a frio. No caso das redes eletrossoldadas de pequeno diâmetro podem ser constituídas por varões nervurados, de 4,0 mm de diâmetro e 4,5 mm de diâmetro, laminados a quente ou laminados a frio, ou por fios lisos de 3,0 mm, 3,4 mm e 3,8 mm de diâmetro (Especificação E 458, 2011) (Especificação E 479, 2012).

2.3.4. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E TECNOLÓGICAS DOS AÇOS PARA BETÃO ESTRUTURAL

2.3.4.1. Aços para betão armado

Os varões de aço para betão armado caracterizam-se essencialmente em termos da sua resistência e ductilidade. Estas características estão associadas à composição química, ao processo de fabrico e aos tratamentos após laminagem. Atualmente existem no mercado varões de alta resistência laminados a quente ou endurecidos a frio, de ductilidade baixa, normal ou especial, e ainda consoante as características de aderência normal ou alta (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

Em geral, os produtos de aços laminados a quente e sujeitos a tratamento térmico (tipo *Tempcore*) caracterizam-se por possuírem uma resistência inferior e uma ductilidade mais elevada, do que os materiais obtidos por endurecimento a frio.

De acordo com as Especificações LNEC, a classe de um aço é dada pelo valor característico da sua tensão de cedência. A ductilidade é caracterizada através da relação entre a tensão de rotura à tração e a tensão de cedência, e a partir da extensão total na força máxima.

Os varões podem também ser classificados quanto à geometria da sua superfície, tendo em conta a sua importância para a aderência mecânica entre o aço e o betão (dimensões, número e configuração das nervuras longitudinais e transversais). Assim, os varões podem então ser classificados como lisos ou nervurados/rugosos.

Outras características que são importantes são a soldabilidade dos aços, a resistência à dobragem, a resistência à fadiga e a resistência à ação cíclica.

Resistência

Em face da relevância da tensão de cedência para a caracterização dos aços, as normas internacionais (EN 10080, 2005) e as especificações nacionais de produtos de aço para betão armado (Especificação E 449, E 450, E 455, E 456, E 458, E 460, E 478, E 479 e E 480) estabelecem que a tensão de cedência deve ser calculada considerando o valor nominal da área transversal inicial do varão (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

No dimensionamento de estruturas de betão armado existe também um consenso sobre o valor da tensão de cedência que deve ser utilizado, pois considera-se o valor característico, correspondente ao valor do quantilho de 5% da distribuição dos valores obtidos experimentalmente para a tensão de cedência.

No entanto, nos varões de aço de ductilidade especial, utilizados em zonas sísmicas, esta propriedade é alvo de especial atenção, uma vez que existem exigências específicas, nomeadamente a fixação de um valor mínimo e de um valor máximo para a tensão de cedência e para o endurecimento.

Em relação aos varões obtidos por endurecimento a frio (varões A500ER) (Especificação E 456, 2011), dado que normalmente não apresentam um patamar de cedência, determina-se a tensão correspondente a 0,2 % da extensão, a tensão limite convencional de 0,2%.

As principais exigências em termos de características mecânicas e de ductilidade presentes nas atuais Especificações LNEC encontram-se sistematizadas no Quadro 4 para cada tipo de aço para armaduras de betão armado.

Ductilidade

O conceito de ductilidade de um elemento define-se como sendo a capacidade do elemento dissipar energia de uma forma estável e controlada, de forma a explorar o regime elastoplástico do material, isto é, a capacidade do material para suportar grandes

deformações sem perda de capacidade resistente, evitando-se assim uma rotura frágil (Pipa, M., 1993).

Ao longo da evolução dos regulamentos de estruturas e da normalização dos produtos de aço (Louro, A. et al, 2002) tem sido dada cada vez mais importância a este parâmetro.

Além disso, satisfazendo o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2012) e o Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2013), os varões passaram a ser também caracterizados em termos da sua ductilidade.

Relativamente aos projetos de estruturas verifica-se que a ductilidade (Pipa, M., 1993):

- Permite o uso de análises lineares elásticas de estruturas, uma vez que este tipo de análise pressupõe que a estrutura possui um certo nível de ductilidade em determinadas zonas, pois num determinado elemento de betão armado a distribuição real de esforços difere da distribuição assumida no dimensionamento, por via da fendilhação e consequente mudança de rigidez, o que leva a redistribuições de forças internas;
- A ductilidade permite ainda recorrer a análises elastoplásticas perfeitas que assumem que a estrutura tem um patamar plástico infinito;
- Permite a deteção do deficiente comportamento em serviço de uma estrutura, através da exibição de grandes deslocamentos.

A principal propriedade para caracterizar a ductilidade de um aço é a extensão total na força máxima de rotura à tração (A_{gt}), que representa a soma da extensão elástica com a extensão permanente no instante em que é atingida a força de rotura à tração. A ductilidade envolve ainda a avaliação da relação entre a tensão de rotura à tração R_m e a tensão de cedência superior R_e .

No Quadro 4 definem-se as exigências, em termos de ductilidade, que se encontram definidas nas Especificações LNEC (Especificação E 449, 2010) (Especificação E 450, 2010) (Especificação E 455, 2010) (Especificação E 460, 2010) (Especificação E 456, 2011) para cada tipo de varões de aço para betão armado.

Quadro 4 - Características mecânicas dos varões de aços para betão armado (Especificação E 449, 2010) (Especificação E 450, 2010) (Especificação E 455, 2010) (Especificação E 460, 2010) e (Especificação E 456, 2011)

Tipo de Aço	$R_{e,k}^{(1)}$ (MPa)	$R_{m,k}^{(1)}$ (MPa)	$A_{gt,k}^{(2)}$ (%)	$R_m/R_e^{(2)}$	$R_m/R_e^{(3)}$	$R_e/R_{e,k}^{(3)}$
A400 NR	400	460	5,0	1,08	-	-
A500 NR	500	550				
A400 NR SD	400	-	8,0	1,15	1,35	1,20
A500 NR SD	500					
A500 ER	500	550	2,5	1,05	-	-

⁽¹⁾ Valor característico mínimo referente ao quantilho de 5 %

⁽²⁾ Valor característico mínimo referente ao quantilho de 10 %

⁽³⁾ Valor característico máximo referente ao quantilho de 90 %

3

Ensaio de Tração dos Produtos de Aço para Betão Estrutural

3.1. NORMAS APLICÁVEIS

A caracterização mecânica dos produtos metálicos é feita recorrendo a um ensaio destrutivo denominado ensaio de tração, que permite avaliar o conjunto de propriedades essenciais para avaliar o desempenho dos varões de aço para betão armado.

Assim, no presente capítulo apresenta-se um resumo, não exaustivo, das normas que regulam este ensaio e discutem-se algumas especificidades associadas aos varões de aço para betão armado.

Atualmente, a nível internacional, as duas normas mais relevantes para a realização do ensaio de tração de produtos de aço para betão armado são a (ISO 6892-1, 2009) e a (ISO 15630-1, 2010).

Tendo em conta que não existe norma europeia harmonizada que permita a marcação CE dos varões de aço e que a norma (EN 10080, 2005) se encontra em desenvolvimento há mais de 20 anos, iniciou-se em 1998 a preparação de documentos nacionais para cada tipo de produto de aço para betão estrutural (Louro, A. et al, 2002).

A utilização em Portugal dos varões de aço para armaduras de betão armado (armaduras ordinárias) é regulada pelo REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de julho (Decreto-Lei nº 349-C, 1983). Este Regulamento especifica os tipos de armaduras usadas e as principais características de cada tipo de armadura, estipulando a obrigatoriedade da sua prévia classificação pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Não existem portanto normas portuguesas para estes produtos.

Com a evolução entretanto registada ao nível da normalização internacional, nas classificações de armaduras pelo LNEC, para além das características especificadas pelo REBAP (Decreto-Lei nº 349-C, 1983), passaram a ser também verificadas outras, designadamente a soldabilidade, as características de aderência e as marcas de identificação. Além disso, satisfazendo o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2012) e o Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2013), os varões passaram a ser também caracterizados em termos da sua ductilidade.

Tendo em vista a harmonização das exigências dos diferentes tipos de produtos, foi decidido elaborar Especificações LNEC para cada um dos tipos de armaduras a classificar,

as quais passaram também a servir como documentos de referência para a certificação de produto.

Assim, em 1998 foram publicadas as Especificações LNEC E 449 e E 450 relativas aos varões de aço dos tipos A400NR e A500NR. Nestas Especificações são referidas, entre outras, as seguintes exigências:

- dimensões e tolerâncias de fabrico;
- composição química;
- homogeneidade do fabrico;
- ductilidade;
- resistência à fadiga;
- geometria das nervuras e tipos de perfil;
- marcas de identificação.

Apesar de ambos os tipos de varões serem considerados de ductilidade alta, a publicação do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2013) que prevê a utilização em zonas sísmicas de um tipo de aço com características especiais de ductilidade, veio evidenciar a necessidade de elaboração de novas Especificações para contemplar os referidos aços.

Assim, em 1999 foi publicada a Especificação LNEC E 455 relativa a varões A400 NR de ductilidade especial, tendo por base a Especificação LNEC E 449, na qual foram introduzidas exigências adicionais relativas à ductilidade e limites superiores para a tensão de cedência real e para o endurecimento, bem como alterações quanto ao perfil nervurado dos varões. Introduziu-se também neste documento a obrigatoriedade da realização de um ensaio cíclico alternado.

No ano 2000, e com o objetivo de colmatar a lacuna existente relativamente aos varões obtidos por endurecimento a frio, foram elaboradas as Especificações LNEC E 456 e E 457, que estabelecem as condições a que devem satisfazer os varões de aço obtidos por este processo com superfície rugosa (A500 ER) e superfície lisa (A500 EL), respetivamente.

Estavam agora criadas as condições para a elaboração de uma Especificação relativa a redes eletrossoldadas, o que foi consubstanciado na Especificação LNEC E458, que define as condições a que devem obedecer as redes eletrossoldadas para armaduras de betão, realizadas com os diferentes tipos de varões.

Entretanto, foram realizados no LNEC, diversos estudos no âmbito de projetos de investigação europeus que visavam a caracterização do comportamento das armaduras sob ações cíclicas alternadas com vista à sua aplicação em estruturas sismo-resistentes. Neste âmbito, concluiu-se em 2002 um estudo mais específico aplicado a armaduras dos tipos A400 NR e A500 NR de ductilidade especial produzidas em Portugal (Pipa, M., Vercesi, A., 1996) (Pipa, M., 1999) (Pipa, M., 2000) (Pipa, M., 2001) (Louro, A. et al, 2002).

A experiência adquirida com a realização dos referidos estudos permitiu a elaboração de uma nova Especificação relativa a varões do tipo A500 NR de ductilidade especial, com

exigências semelhantes às estabelecidas para os varões do tipo A400 NR de ductilidade especial, que constitui a Especificação E 460.

Com a realização dos referidos estudos foi também necessário rever a E 455, já que a exigência relativa ao ensaio cíclico passou a ser de 10 ciclos sem rotura, em vez dos 3 inicialmente previstos.

Mais recentemente (2008) foram feitas alterações no sentido de convergir com a norma europeia (EN 10080, 2005). Neste contexto, foi acrescentado um valor limite para o teor em cobre (Cu) na composição química do vazamento e do produto final e também a possibilidade de fabrico e comercialização de varões com diâmetro 14 mm.

Com vista a convergir ainda com a referida norma europeia no que se refere aos códigos de marcação dos varões, no início de 2010 o LNEC procedeu novamente à revisão deste conjunto de especificações.

Assim, o início da marcação destes produtos passou a ser assinalado através do engrossamento de duas nervuras seguidas (ao invés do engrossamento de duas nervuras alternadas). Foram também adaptados os códigos de identificação dos países de origem dos varões.

Ao longo dos anos, o LNEC tem assegurado a atualização técnico-científica destes documentos disponibilizando ao meio técnico nacional requisitos, sob a forma de Especificações LNEC, que cobrem a totalidade das armaduras para betão empregues no país, ou seja, que definem, para além das características mecânicas e tecnológicas, a geometria das nervuras, os ensaios a realizar para a sua qualificação e as respetivas condições de aceitação, e ainda as marcas de identificação de cada produto.

Portanto, em Portugal, aplicam-se como normas de produto as Especificações LNEC. Estes documentos que, como já foi referido, seguem de perto os desenvolvimentos técnico-científicos e se baseiam em normas europeias (EN) e internacionais (ISO), permitem saber quais os ensaios necessários à avaliação da conformidade das armaduras para a determinação dos parâmetros mais importantes.

Existem depois normas que regem a utilização dos equipamentos necessários à realização do ensaio de tração, como por exemplo a (NP EN ISO 7500-1, 2006) relativa à calibração do sistema de medição de força da máquina ou a (NP EN ISO 9513, 2014) que define as regras a observar na calibração de extensómetros utilizados em ensaios uniaxiais.

3.2. DEFINIÇÃO DAS PRINCIPAIS GRANDEZAS ENVOLVIDAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO

A norma (ISO 6892-1, 2009) define o processo do ensaio de tração, com o objetivo de determinar uma ou várias das características do produto.

Esta norma define também as principais grandezas envolvidas no ensaio (Figura 16 a Figura 19):

- comprimento inicial entre referências (L_0): Comprimento entre referências antes da aplicação da força de ensaio (Figura 18);

- comprimento final entre referências (L_u): Comprimento entre referências após a rotura do provete (Figura 18);
- comprimento da zona útil (L_c): Comprimento do troço de secção constante de menor área transversal do provete (Figura 18);
- alongamento: Acréscimo do comprimento inicial entre referências (L_0) num dado instante durante o ensaio;
- extensão: Alongamento expresso em percentagem do comprimento inicial entre referências (L_0);
- extensão após rotura (A): Alongamento remanescente após rotura ($L_u - L_0$), expresso em percentagem do comprimento inicial entre referências (L_0) (Figura 16);
- extensão total na força máxima à tração (A_{gt}): Acréscimo do comprimento entre referências do provete na força de rotura à tração, expresso em percentagem do comprimento inicial entre referências (L_0). Distingue-se a extensão total na força máxima à tração A_{gt} (Figura 16) e a extensão permanente na força máxima à tração A_g (Figura 16);
- comprimento da base do extensómetro (L_e): Comprimento da zona útil do provete utilizado na medição da deformação extensométrica através de um extensómetro;
- força de rotura à tração (F_m): Maior força suportada pelo provete durante o ensaio, após a cedência. Para materiais sem cedência, é o máximo valor durante o ensaio;
- tensão convencional: Força em qualquer instante do ensaio, dividida pela área da secção inicial da zona útil do provete S_0 ;
- tensão de rotura à tração (R_m): Tensão convencional correspondente à força de rotura à tração F_m (Figura 16);
- tensão de cedência: Num ensaio em que um material metálico apresenta um efeito de cedência, existe um instante do ensaio em que ocorre uma deformação plástica sem aumento da força;
- tensão de cedência superior (R_{eH}): Valor da tensão convencional no instante em que se observa a primeira queda da força (Figura 19);
- tensão de cedência inferior (R_{eL}): Menor valor da tensão convencional durante a cedência, desprezando-se eventuais fenómenos transitórios (Figura 19);
- tensão limite convencional de proporcionalidade (R_p): Tensão convencional a que corresponde uma deformação extensométrica permanente igual a uma percentagem especificada do comprimento da base do extensómetro L_e (Figura 17).

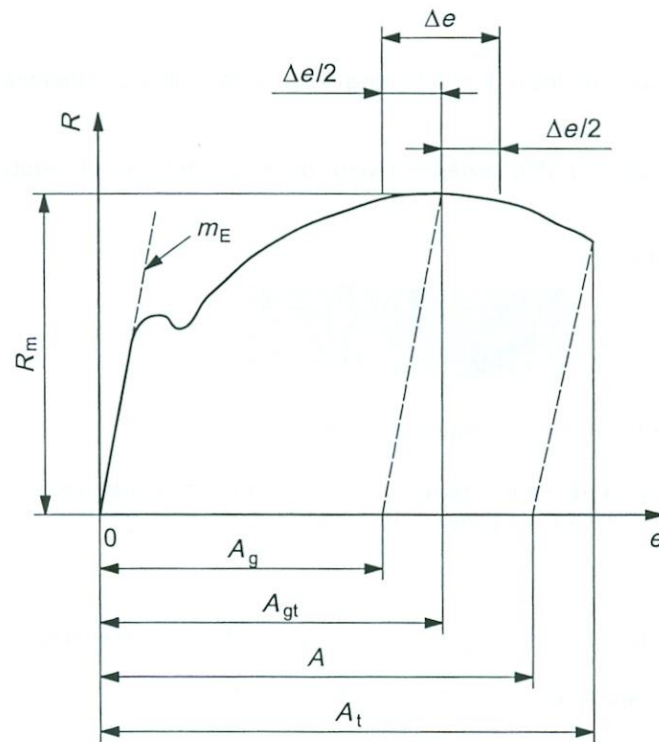


Figura 16 - Definição do alongamento (ISO 6892-1, 2009)

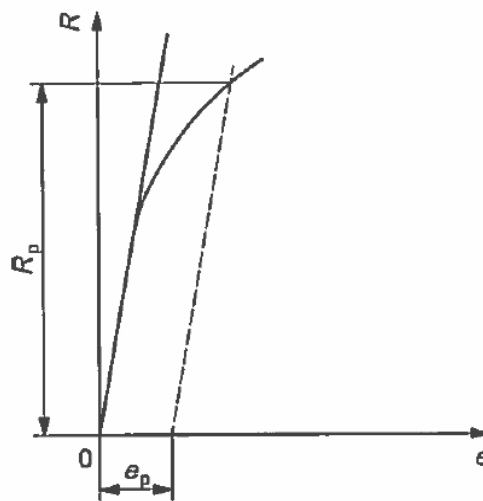
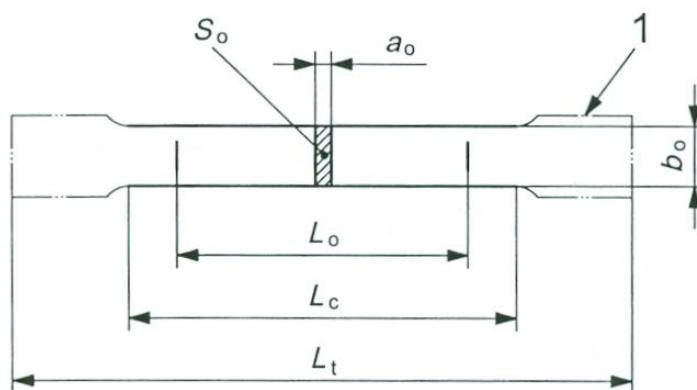
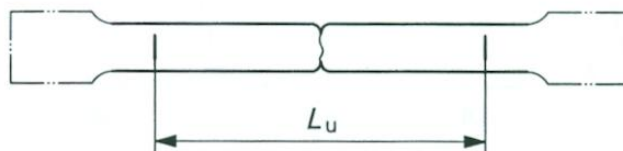


Figura 17 - Tensão limite convencional de proporcionalidade (ISO 6892-1, 2009)



a) Before testing



b) After testing

Figura 18 - Provete maquinado (ISO 6892-1, 2009)

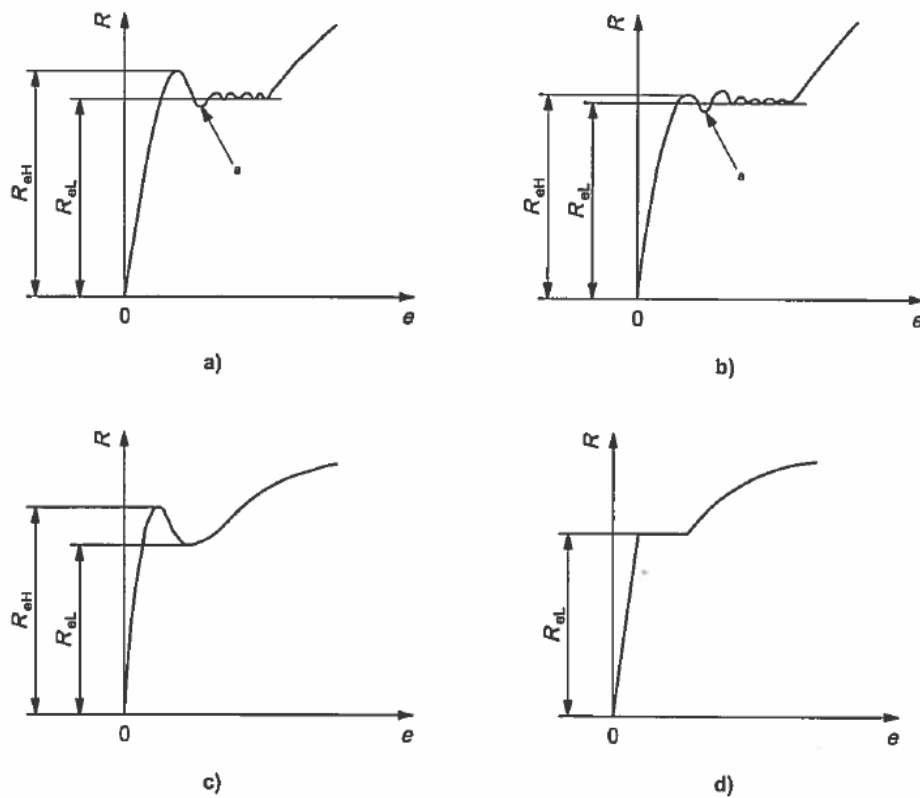


Figura 19 - Tensões de cedência superior e inferior (ISO 6892-1, 2009)

3.3. CONDIÇÕES DE ENSAIO

De acordo com as normas aplicáveis, os ensaios devem ser efetuados à temperatura ambiente entre 10 °C e 35 °C. No caso dos ensaios realizados no âmbito deste estudo, os mesmos foram realizados em condições controladas na Unidade de Produtos Metálicos (UPM) a uma temperatura de 23 °C ± 5 °C.

A realização do ensaio de tração exige que o sistema de medição de força da máquina de ensaio se encontre calibrado de acordo com a norma (NP EN ISO 7500-1, 2006), devendo ser pelo menos de classe 1.

Relativamente aos extensómetros, a sua utilização nas condições previstas pela norma do ensaio de tração (ISO 6892-1, 2009) exige que os mesmos se encontrem calibrados de acordo com a norma (NP EN ISO 9513, 2014), devendo assegurar-se que os mesmos são pelo menos de classe 1 para se determinar a tensão limite convencional de proporcionalidade. Para a determinação de outras propriedades podem ser utilizados extensómetros de classe 2.

Para a realização do ensaio de tração, o provete a ensaiar deve ser fixado através de sistemas de amarração adequados, tais como garras em cunha, suportes roscados, suportes com ressalto, garras hidráulicas, de modo a não causar danos à superfície do provete.

No caso de ensaios de materiais frágeis ou quando se pretende determinar a tensão limite convencional de proporcionalidade, a tensão limite convencional de extensão total ou a tensão de cedência, é particularmente importante que sejam desenvolvidos todos os esforços possíveis para assegurar que os provetes sejam amarrados de modo a que a força seja aplicada o mais axialmente possível.

Se a rotura ocorrer numa amarração ou numa distância das amarrações inferior a 20 mm ou ao diâmetro do provete d , no caso de varões de aço, o ensaio pode ser considerado inválido se o resultado não for satisfatório (ISO 6892-1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010).

O comprimento livre entre as garras da máquina deve ser suficiente para que as marcas de referências fiquem a uma distância razoável destas garras. O comprimento da zona útil (L_c) deve ser sempre superior ao comprimento inicial entre referências (L_0).

As extremidades do comprimento inicial entre referências são gravadas através de pequenas marcas ou de traços de ponta seca, com exclusão de marcas que formem entalhes que possam dar origem a roturas prematuras.

Relativamente à velocidade de ensaio, a norma (ISO 6892-1, 2009) define que a mesma pode variar de acordo com certos limites. Para se determinar a tensão de cedência superior, a velocidade de afastamento das cabeças de amarração deve ser tão constante quanto possível e encontrar-se compreendida entre valores correspondentes aos limites de velocidade de aplicação da força indicados no Quadro 5.

No que diz respeito à determinação da tensão limite convencional de proporcionalidade, a velocidade de aplicação da força deve encontrar-se dentro dos limites fixados no Quadro 5.

No domínio elástico, até à tensão limite convencional de proporcionalidade ou a tensão limite convencional da extensão total ser atingida, a velocidade de ensaio não deve conduzir a uma variação de extensão superior a $0,0025 \text{ s}^{-1}$ (ISO 6892-1, 2009).

Quadro 5 - Limites de velocidade aplicação da força (ISO 6892-1, 2009)

Módulo de elasticidade do material (E) MPa	Velocidade de aplicação da força MPa.s ⁻¹	
	min.	máx.
< 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60

Depois da determinação das tensões de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade, a velocidade de ensaio pode ser aumentada até uma velocidade de deformação máxima correspondente a uma variação de extensão de $0,008 \text{ s}^{-1}$.

3.4. PROPRIEDADES OBTIDAS A PARTIR DO ENSAIO DE TRAÇÃO

3.4.1. DETERMINAÇÃO DA ÁREA DA SECÇÃO INICIAL DA ZONA ÚTIL

A norma (ISO 6892-1, 2009) especifica tolerâncias máximas relativas às dimensões transversais dos provetes. Para o cálculo do valor das tensões, a norma permite o uso da secção inicial nominal da zona útil desde que as tolerâncias de forma sejam respeitadas.

As Especificações LNEC definem exatamente o mesmo critério.

No caso dos produtos nervurados, a área da secção transversal inicial é determinada a partir do comprimento e da massa do provete, já que devido ao perfil das nervuras estes produtos apresentam uma configuração superficial irregular. Deste modo a área da secção transversal inicial é determinada segundo a expressão:

$$S_0 = \frac{m}{L_i \times \rho} \quad (1)$$

em que:

S_0 representa a área da secção transversal do provete;

m representa a massa do provete;

L_i representa o comprimento inicial do provete;

ρ representa a massa volúmica do provete.

No caso dos varões de aço para betão armado, considera-se uma massa volúmica de 7850 kg/m^3 (Especificação E 449, 2010) (Especificação E 450, 2010) (Especificação E 455, 2010) (Especificação E 456, 2011) (Especificação E 460, 2010).

3.4.2. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO APÓS ROTURA

De acordo com as normas (ISO 6892-1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010) a determinação da extensão após rotura pode ser feita recorrendo a um método manual ou a um método automático com recurso a um extensómetro. Em ambos os métodos, no caso de provetes proporcionais, o comprimento inicial entre referências deve ser igual a $5d$. Em caso de disputa, a extensão após rotura deve ser determinada manualmente.

O método manual consiste no ajuste cuidadoso das secções de rotura dos dois fragmentos do provete, de modo a que os respetivos eixos fiquem no prolongamento um do outro.

Devem ser tomadas precauções especiais para assegurar o bom contacto dos topos dos fragmentos dos provetes durante a medição do comprimento final entre referências. Estas precauções são particularmente importantes no caso de provetes de secção reduzida, ou que apresentem valores baixos de alongamento. A norma (ISO 6892-1, 2009) define condições especiais para provetes com valores de extensão após rotura inferiores a 5%.

Caso se recorra à utilização de equipamentos de ensaio que possibilitem a medição da deformação por recurso a um extensómetro usado até à rotura, as marcas de referência não são necessárias. Neste caso, o valor medido é a deformação extensométrica total na rotura, à qual é necessário deduzir a deformação elástica do provete. Posteriormente divide-se o resultado da diferença pelo comprimento de base do extensómetro, para obter a extensão após rotura. A medição da deformação extensométrica total na rotura só é válida se a rotura estiver dentro do comprimento de base do extensómetro.

3.4.3. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA À TRAÇÃO

A determinação da extensão total na força máxima A_{gt} pode também, de acordo com as normas (ISO 6892-1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010), ser efetuada através de dois métodos. O primeiro consiste na determinação através da medição da deformação do provete após rotura (método manual) e o segundo baseia-se na determinação através do registo da deformação medida a partir de um extensómetro instalado no início do ensaio do provete (método automático).

A norma (ISO 6892-1, 2009) faz referência no seu Anexo I à possibilidade de se determinar a extensão na força máxima através do método manual. Este método consiste em medir, na parte mais longa do provete fraturado num ensaio de tração, a extensão permanente na força máxima A_g , a partir da qual é calculada a extensão total na força máxima A_{gt} .

Para que tal seja possível, antes de se realizar o ensaio, efetuam-se marcações equidistantes ao longo da zona útil do provete (Figura 20), devendo a distância entre duas marcas consecutivas ser igual a um submúltiplo do comprimento inicial entre referências (L'_0). A marcação dos comprimentos entre referências deverá ser feita com uma tolerância de $\pm 0,5 \text{ mm}$. O comprimento entre referências (L'_0) é função do valor da extensão total e, no caso de varões para betão armado, deve ser igual a 100 mm.

Para medição do comprimento final após rotura (L_u) recorre-se à utilização de um paquímetro, sendo a medição feita na parte mais longa do provete fraturado e com uma tolerância de $\pm 0,5$ mm (Figura 21).

Para que a medição possa ser considerada válida de acordo com o disposto na norma (ISO 6892-1, 2009), é necessário que os limites da zona de medição se encontrem localizados a uma distância de pelo menos 50 mm ou $2d$ da secção de rotura, e a uma distância de pelo menos 20 mm ou d da garra mais próxima.

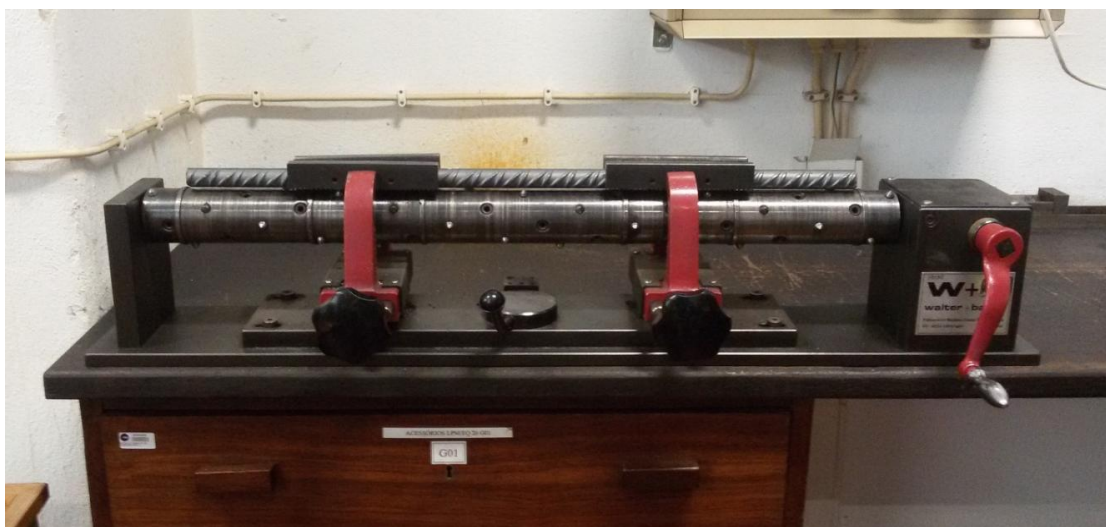


Figura 20 - Máquina de marcação equidistante ao longo da zona útil dos provetes



Figura 21 - Paquímetro digital

Desta forma, a extensão permanente na força máxima, A_g , expressa em percentagem, é calculada através da seguinte expressão:

$$A_g = \frac{L'_u - L'_0}{L'_0} \times 100 \quad (2)$$

em que:

A_g representa a extensão permanente na força máxima;

L'_u representa o comprimento final entre referências para a determinação do A_g ;

L'_0 representa o comprimento inicial entre referências para a determinação do A_g .

Portanto, para se obter a extensão total na força máxima, A_{gt} , expressa em percentagem, é necessário adicionar a extensão elástica, pelo que se recorre à seguinte expressão:

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{E} \times 100 \quad (3)$$

em que:

A_{gt} representa a extensão total na força máxima;

R_m representa a tensão máxima registada no decorrer do ensaio, em MPa;

E , representa o módulo de elasticidade do material: 200 GPa no caso de varões para betão armado.

No caso de se determinar a extensão total na força máxima recorrendo a um extensómetro instalado no início do ensaio do provete (método automático), para o cálculo da extensão total na força máxima à tração, este deve possuir um comprimento de base de pelo menos 100 mm.

3.4.4. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO LIMITE CONVENCIONAL DE PROPORCIONALIDADE

A tensão limite convencional de proporcionalidade deve ser determinada a partir do diagrama força - deformação extensométrica, traçando-se uma reta paralela à zona retilínea da curva, passando pela abcissa correspondente à extensão permanente definida, por exemplo 0,2%. O ponto onde esta reta intersecta a curva força-deformação extensométrica permite obter o valor da força correspondente à tensão limite convencional de proporcionalidade pretendida (Figura 17). A determinação da tensão exige ainda que a força determinada seja dividida pelo valor nominal da área da secção inicial da zona útil do provete.

3.4.5. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CEDÊNCIA SUPERIOR E DA TENSÃO DE ROTURA À TRAÇÃO

Os valores das forças correspondentes à tensão de cedência superior e da tensão de rotura à tração determinam-se através do indicador de força da máquina de ensaio ou do diagrama força - deformação extensométrica. As tensões em causa são também obtidas dividindo-se

as forças correspondentes pelo valor nominal da área da secção inicial da zona útil do provete.

O valor da tensão de cedência superior deverá ser considerado como o valor de tensão correspondente ao valor mais elevado da força antes de ocorrer uma redução da mesma, seguida de uma região na qual a força não deverá exceder o anterior máximo ao longo de uma extensão (ISO 6892 Parte 1, 2009).

3.5. COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DOS PRODUTOS DE AÇO PARA BETÃO ESTRUTURAL

3.5.1. ARMADURAS OBTIDAS POR LAMINAGEM A QUENTE

Os varões de aço podem apresentar uma resistência elevada e uma ductilidade considerável. No diagrama da Figura 22 apresenta-se um exemplo de um diagrama tensão-extensão de uma armadura de aço para betão armado laminado a quente, determinado através de um ensaio de tração uniaxial. No referido diagrama é possível distinguir uma primeira fase de comportamento, designada por fase elástica, em que se verifica uma relação de proporcionalidade entre as tensões e as extensões, sendo esta proporcionalidade uma característica do material, que é convencionalmente designada por módulo de *Young* ou módulo de elasticidade, E .

O módulo de elasticidade é uma constante do material que no caso do aço para betão armado, se situa nos 200 GPa.

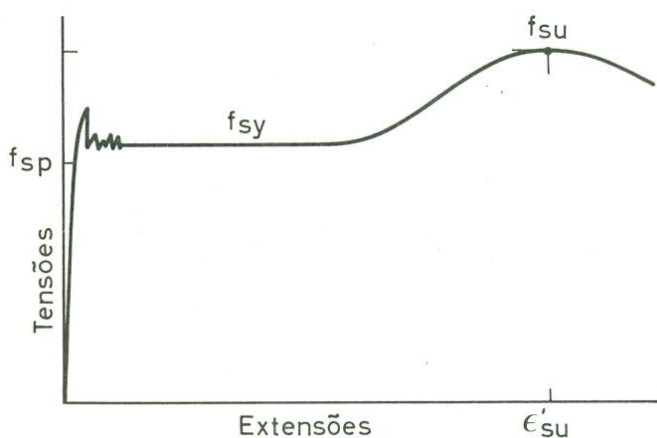


Figura 22 - Diagrama tensão-extensão de um aço laminado a quente (D'Árga e Lima, J., 1983)

Seguidamente no diagrama há uma fase em que as extensões aumentam sob uma tensão praticamente constante, a tensão de cedência f_{sy} ou R_e , sendo esta zona habitualmente designada por patamar de cedência. Ultrapassado o patamar de cedência, o material entra numa terceira fase, designada por fase de endurecimento, em que a tensão volta a aumentar com as extensões, até alcançar um valor máximo no diagrama, convencionalmente designado por tensão de rotura à tração f_{su} ou R_m .

Depois do provete deixar a fase elástica iniciam-se as deformações plásticas, o que significa que se o provete for descarregado, surgem deformações permanentes. Durante a fase de endurecimento, a tensão necessária para continuar a produzir deformações plásticas

aumenta com essas mesmas extensões plásticas. Nesta fase, o volume do provete permanece constante, ou seja, à medida que o provete é alongado, a sua secção transversal diminui ao longo do seu comprimento (D'Arga e Lima, J., 1983).

Considerando que os provetes possuem imperfeições geométricas e físicas (tensões residuais, heterogeneidade da estrutura e das propriedades do material, provenientes do seu processo de fabrico), e que as condições de ensaio não são completamente perfeitas (devido por exemplo a eventuais excentricidades de aplicação da força de ensaio, provenientes de desalinhamentos do equipamento de ensaio) existem secções transversais com resistência distintas e submetidas a diferentes tensões, pelo facto da flexão do provete associada às referidas imperfeições. Assim, as secções transversais do provete não entram todas simultaneamente no patamar de cedência.

Porém, o aumento gradual da resistência do material na fase de endurecimento permite compensar a diferença de resistência das secções, e fazer com que estas entrem progressivamente nas fases de cedência e de endurecimento.

Quando numa determinada zona do provete, uma secção transversal atinge a sua resistência máxima, o endurecimento do material deixa de compensar a redução da sua área, pelo que esta redução passa a efetuar-se de uma forma muito mais rápida, o que conduz a uma perda progressiva da resistência da secção. Este facto está na origem de um fenómeno localizado, na vizinhança desta secção mais fraca, que se designa por fenómeno de estricção. Nesta zona, a força necessária para produzir um alongamento unitário vai diminuindo progressivamente, até se atingir a rotura propriamente dita do provete (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

Assim, o valor da extensão após rotura do material é função da extensão na rotura e da deformação ocorrida durante o fenómeno da estricção. Portanto, a extensão após rotura depende do comprimento inicial entre referências, aumentando com a diminuição deste comprimento. Por este motivo, as normas de ensaio e os regulamentos fixam o valor do comprimento inicial entre referências, sendo comum encontrar definidos comprimentos iniciais entre referências iguais a 5 ou 10 vezes o diâmetro do provete. O trabalho desenvolvido em 1983 por D'Arga e Lima (D'Arga e Lima, J., 1983) refere que numa primeira aproximação se pode dizer que a extensão após rotura medida num comprimento entre referências iguais a 5 diâmetros é 1,4 vezes maior que a extensão após rotura medida num comprimento entre referências igual a 10 diâmetros. Como esta relação depende dos diâmetros envolvidos e da qualidade do aço é necessário, em cada caso, saber qual a relação em causa.

Salienta-se ainda que, antes de se iniciar o patamar de cedência, pode ocorrer uma diminuição brusca da tensão aplicada (correspondente a uma queda do valor da força no indicador do dispositivo da máquina), que estabiliza posteriormente num valor inferior e que se mantém aproximadamente constante ao longo do patamar de cedência. O valor mais elevado da tensão, antes da diminuição brusca referida, é a tensão de cedência superior e o valor mais baixo da tensão, após esta diminuição é a tensão de cedência inferior.

As normas relativas a produtos de aço para betão consideram que a tensão de cedência é a tensão de cedência superior.

Dependendo da composição química do material e dos tratamentos térmicos e mecânicos a que este foi sujeito, o comprimento do patamar de cedência pode ser variável. Em alguns produtos, o diagrama tensão-extensão não apresenta patamar de cedência, e a transição entre as fases de comportamento elástico e plástico ocorre de uma forma progressiva, pelo que não é possível determinar a tensão de cedência, como a mesma se encontra definida. Nestes casos, para caracterizar a resistência do material recorre-se, ao conceito de tensão limite convencional de proporcionalidade R_p , que corresponde ao valor da tensão quando o material atinge um dado valor de extensão permanente. A Figura 23 indica um exemplo de determinação da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $f_{s0,2}$ ou $R_{p0,2}$ (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

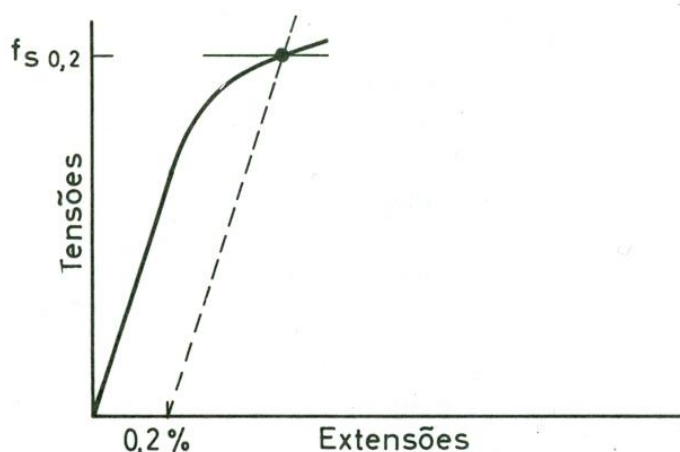


Figura 23 - Tensão limite convencional de proporcionalidade (D'Arga e Lima, J., 1983)

Apesar de ser comum a determinação da tensão limite convencional de proporcionalidade por a sua determinação laboratorial ser mais simplificada, a fronteira entre o regime de comportamento elástico e o regime de comportamento plástico, quando começam a ocorrer deformações permanentes, é designada por tensão limite de elasticidade, sendo este limite que mais importa conhecer em termos práticos.

3.5.2. ARMADURAS OBTIDAS POR ENDURECIMENTO A FRIO

Quando um varão de aço macio (aço laminado a quente de resistência relativamente baixa e de grande deformabilidade plástica) é deformado, durante um ensaio de tração, até ao ponto A (Figura 24), na região das grandes deformações plásticas e, posteriormente, é descarregado de A até A' (Figura 24), se instantaneamente a seguir se proceder a nova carga, o diagrama tensões-extensões terá o andamento A'BC, a tensão de rotura mantém-se mas as extensões na rotura e após rotura, calculadas com a origem em A', diminuem significativamente. Este processo de transformação de propriedades, que resulta de se terem introduzido no material consideráveis deformação permanentes, designa-se por trabalho a frio (ou endurecimento a frio) que pode ser realizado por estiragem.

No entanto, se depois do varão ser descarregado, ele for deixado em repouso durante um determinado tempo, ocorrem transformações na estrutura interna do aço que se designam por envelhecimento. Se o varão em causa for posteriormente tracionado, o seu diagrama tensões-extensões passa a ser, o diagrama A'ADE da Figura 24 (D'Arga e Lima, J., 1983).

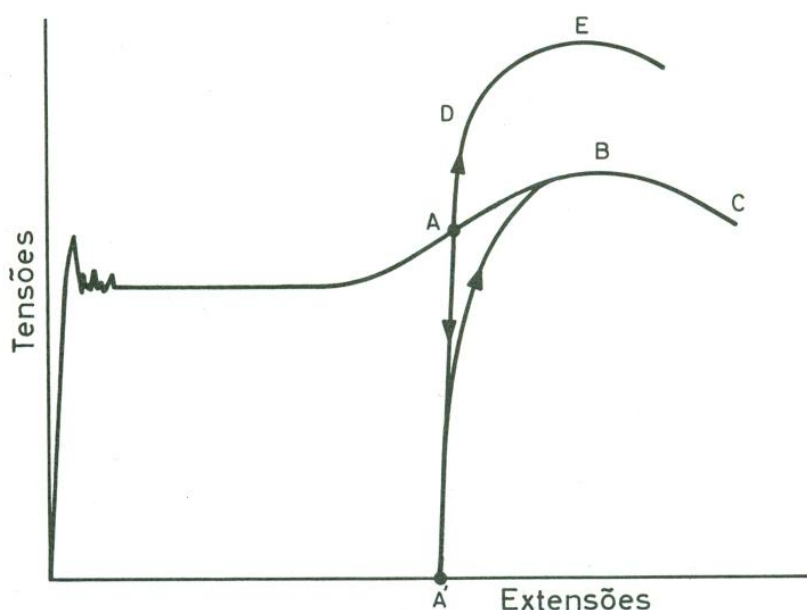


Figura 24 - Diagrama tensões-extensões de aço antes e após “trabalho a frio” (D’Arga e Lima, J., 1983)

Portanto, o material passou neste caso a apresentar, relativamente à situação inicial (sem estiragem), tensões limite de proporcionalidade e de rotura mais elevadas e extensões na rotura e após rotura mais baixas (menor ductilidade). Verifica-se também que o valor do módulo de elasticidade se manteve e que o patamar de cedência desapareceu. Esta transformação de propriedades, resultante de um trabalho a frio, em que há um aumento da resistência e uma diminuição de ductilidade, é designada por endurecimento a frio.

No entanto, convém salientar que só há endurecimento a frio quando há envelhecimento depois do trabalho a frio, e quando este provoca deformações permanentes do mesmo sinal das que posteriormente vão ser aplicadas ao varão. Assim, não há endurecimento a frio quando o trabalho a frio for, por exemplo, de compressão e a seguir se aplicar tração ao varão. No caso do trabalho a frio ser realizado por torção, pode haver endurecimento a frio tanto para esforços de tração como de compressão, em virtude de as deformações permanentes implantadas terem direção diferente das que posteriormente são impostas (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

Portanto, as principais características dos aços endurecidos a frio, relativamente às do aço original, são as seguintes (Figura 25): mesmo módulo de elasticidade, ausência de patamar de cedência, tensões limite de proporcionalidade e de rotura mais elevadas e extensões na rotura e após rotura significativamente mais baixas.

Como não há tensão de cedência, nestes aços é preciso considerar, como parâmetro característico, a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $f_{p0,1}$ ou $R_{p0,1}$, ou a 0,2%, $f_{p0,2}$ ou $R_{p0,2}$, que se pode definir como a tensão correspondente à interseção do diagrama tensões-extensões com uma reta paralela ao troço retilíneo do diagrama e passando pela extensão de 0,1% ou 0,2% (D’Arga e Lima, J., 1983).

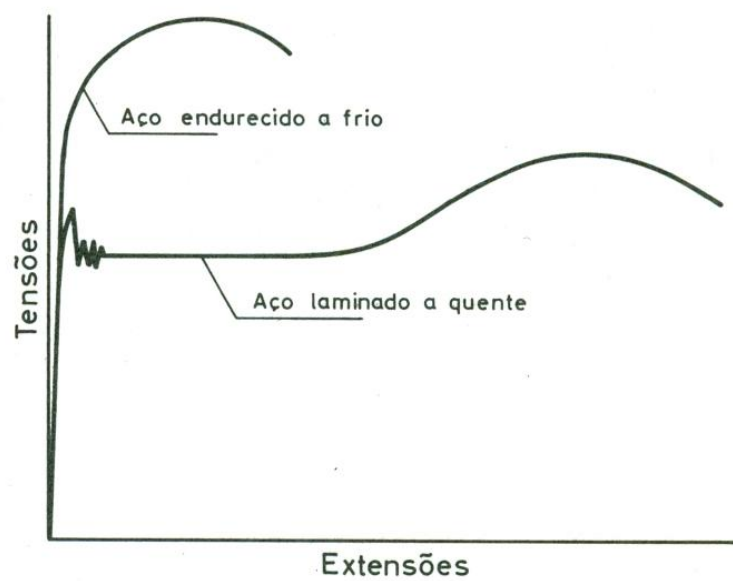


Figura 25 - Comparação entre diagramas tensão-extensão (D'Arga e Lima, J., 1983)

4

Extensão Total na Força Máxima

4.1. INTRODUÇÃO

As características das armaduras são um aspeto essencial à avaliação do comportamento de elementos de betão armado, na medida em que as armaduras asseguram a resistência do elemento estrutural em relação aos estados limite últimos e contribuem para assegurar um comportamento adequado em condições de serviço. Assim, a armadura desempenha um papel muito importante, garantindo o controlo do comportamento das secções de betão armado sujeitas a esforços de tração após a fendilhação do betão.

De acordo com o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2012) para a execução de estruturas de betão armado só é admitida a utilização de varões nervurados e portanto considerados de alta aderência.

Conforme já se referiu anteriormente, em Portugal, utilizam-se fundamentalmente cinco tipos diferentes de varões de aço para betão armado: A500ER, A400NR, A500NR, A400NR SD e A500NR SD.

Destes cinco tipos, o primeiro é obtido por endurecimento a frio pelo que consequentemente possui uma menor ductilidade (Classe A) e os restantes são obtidos por laminagem a quente encontrando-se distribuídos em duas classes de ductilidade distintas: Classes B e C (Louro, A., 2014).

Dada a relevância que têm as características mecânicas no comportamento dos elementos de betão armado, neste capítulo aborda-se em particular a importância da avaliação da extensão total na força máxima, A_{gt} , na medida em que esta propriedade é cada vez mais relevante para o dimensionamento de estruturas em zonas sísmicas.

4.2. DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

O diagrama tensões-extensões de cada um dos diferentes tipos de armaduras de aço existentes no mercado possui características específicas, conforme indicado na Figura 26. Estas características têm uma influência determinante na deformabilidade e distribuição de esforços nas estruturas de betão armado.

A ductilidade dos elementos estruturais depende em grande parte da ductilidade das armaduras de aço, constituindo um requisito básico para diversas metodologias de análise e dimensionamento de estruturas como sejam, por exemplo, a análise elástica com redistribuição de esforços e a análise plástica. Por outro lado, a ductilidade influencia diversos aspetos importantes do comportamento das estruturas tais como: o aparecimento

de grandes deformações o que serve como aviso prévio relativo a situações de rotura, a capacidade de suportar deformações impostas originadas, por exemplo, por variações de temperatura, assentamentos de apoio, retração e fluência, a capacidade de suportar ações acidentais imprevistas sem colapsarem e a capacidade de dissipação de energia sob a ação de cargas cíclicas como os sismos (Louro, A., 2014).

A ductilidade das armaduras de aço para betão armado é medida normalmente por dois parâmetros: a deformação associada a tensão máxima ou de rotura (R_m) ou extensão total na força máxima (A_{gt}) e a relação entre a tensão de rotura (R_m) e a tensão de cedência (R_e) ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ($R_{p0,2}$), designada por coeficiente de endurecimento R_m/R_e ou $R_m/R_{p0,2}$.

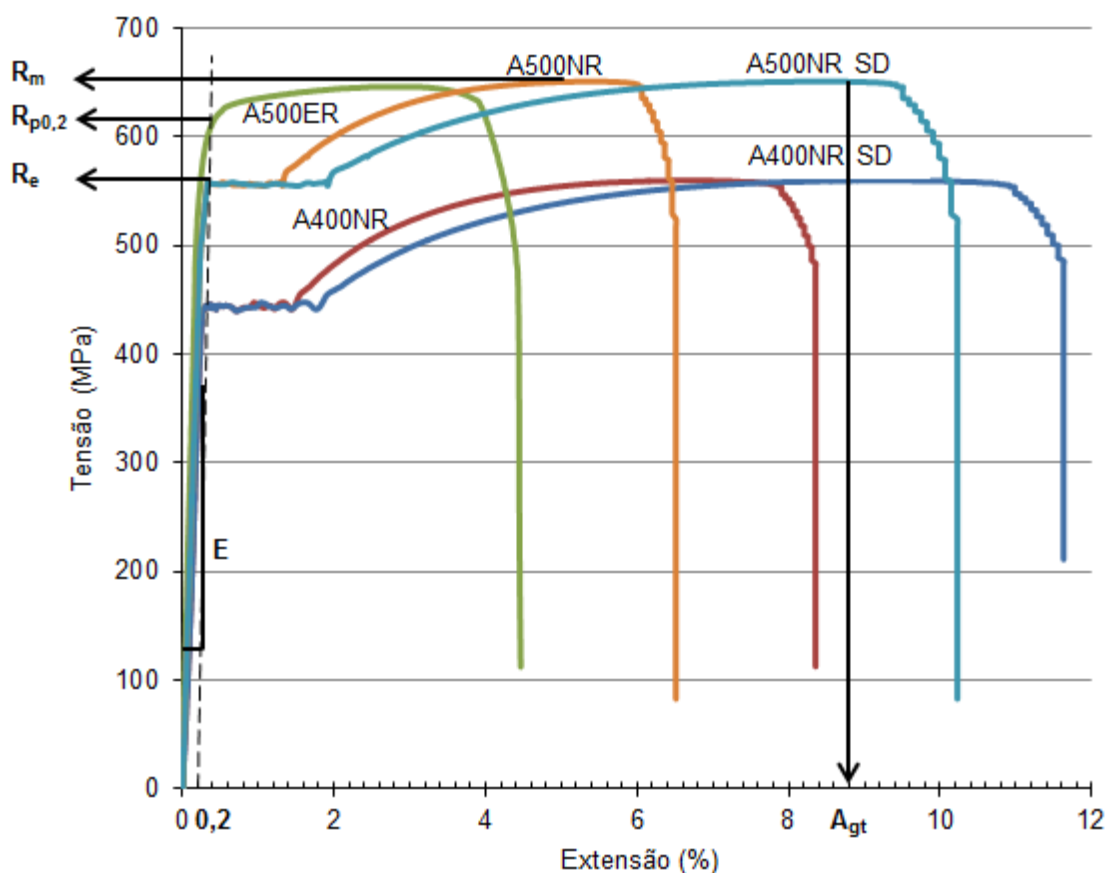


Figura 26 - Diagrama tensão-extensão típico dos cinco tipos de aço (Louro, A., 2014)

No Quadro 6 sistematiza-se a ductilidade que as armaduras de aço para betão armado disponíveis no mercado português têm que satisfazer, considerando-se que são representativas também do mercado europeu, uma vez que existem inúmeras siderurgias que exportam a sua produção para Portugal.

De acordo com o Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2013), nas zonas críticas dos elementos primários de estruturas situadas em zonas sísmicas é necessário satisfazer determinadas disposições e garantir que as armaduras de aço para betão armado utilizadas são apenas de ductilidade B ou C, de acordo com os critérios definidos no Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2012).

A ductilidade exigida às armaduras de aço para betão armado depende também da classe de ductilidade da estrutura onde os elementos vão estar inseridos. O Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2013) distingue as estruturas, sob o ponto de vista do comportamento, em três classes de ductilidade distintas:

- Ductilidade baixa (DCL);
- Ductilidade média (DCM);
- Ductilidade alta (DCH).

Quadro 6 - Classe de ductilidade nas armaduras de aço para betão armado (NP EN 1998-1, 2013)

Classes de ductilidade			
Estruturas	DCL	DCM	DCH
Ductilidade	A	B	B ou C
Tipo de armaduras de aço para betão armado	A500 ER	A400 NR ou A500 NR	A400 NR SD ou A500 NR SD

4.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A DUCTILIDADE DOS ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO

Aquando do dimensionamento das estruturas para suportar a ação dos sismos, considera-se habitualmente que as estruturas se deformam para além do limite elástico e tira-se partido da sua capacidade de dissipação da energia por histerese. Para que tal seja possível, é imprescindível que as estruturas e os seus elementos apresentem boas características de ductilidade, considerando que a ductilidade representa a capacidade que os elementos têm para se deformar após cedência sem que haja uma redução considerável da capacidade resistente (Pipa, M., 1993).

O estudo desenvolvido por Pipa em 1993 exemplifica de forma simplificada o comportamento não linear de uma estrutura sujeita à ação de um sismo intenso, ilustrando o referido conceito de ductilidade através do comportamento de um oscilador com um grau de liberdade (Park, R., Paulay, T., 1975). O oscilador, quando responde elasticamente, apresentará uma resposta em termos de força-deslocamento conforme se indica na Figura 27a), em que o ponto **b** é o ponto de resposta máximo. A área **abc** abaixo da curva representa a energia potencial acumulada para o deslocamento máximo, quando a massa em movimento volta à posição inicial, a energia é convertida em energia cinética. Se o oscilador não possuir capacidade para resistir à força de inércia total que se produz, forma-se uma rótula plástica, cuja deformação, simplificada elasticamente, é a que se indica na Figura 27b). Quando o oscilador atinge a sua capacidade plástica, a sua resposta segue segundo a linha **de** representado o ponto **e** a deformação máxima. A energia potencial acumulada no ponto **e** é agora representada pela área **adef**. Note-se que as forças atuantes nas estruturas ficaram limitadas à capacidade resistente da mesma. Quando a massa em movimento volta à posição inicial a energia convertida em energia cinética é apenas a área triangular **efg**, uma vez que a energia representada pela área **adef** é dissipada na rótula

sendo convertida em calor e em outras formas de energia que não são recuperáveis. Desta forma, mostra-se que enquanto no oscilador que responde elasticamente em cada ciclo toda a energia acumulada é restituída como energia cinética, na estrutura elastoplástica apenas uma parte da energia é restituída (Pipa, M., 1993).

Assim, a energia potencial acumulada na estrutura elastoplástica em cada ciclo não necessita de ser tão grande como na estrutura elástica, e a deformação máxima da estrutura elastoplástica não é necessariamente muito maior do que a da estrutura elástica. Pipa refere no seu trabalho (Pipa, M., 1993) que este facto é confirmado por análises dinâmicas realizadas por vários outros autores que obtêm deslocamentos máximos semelhantes para os dois tipos de estruturas.

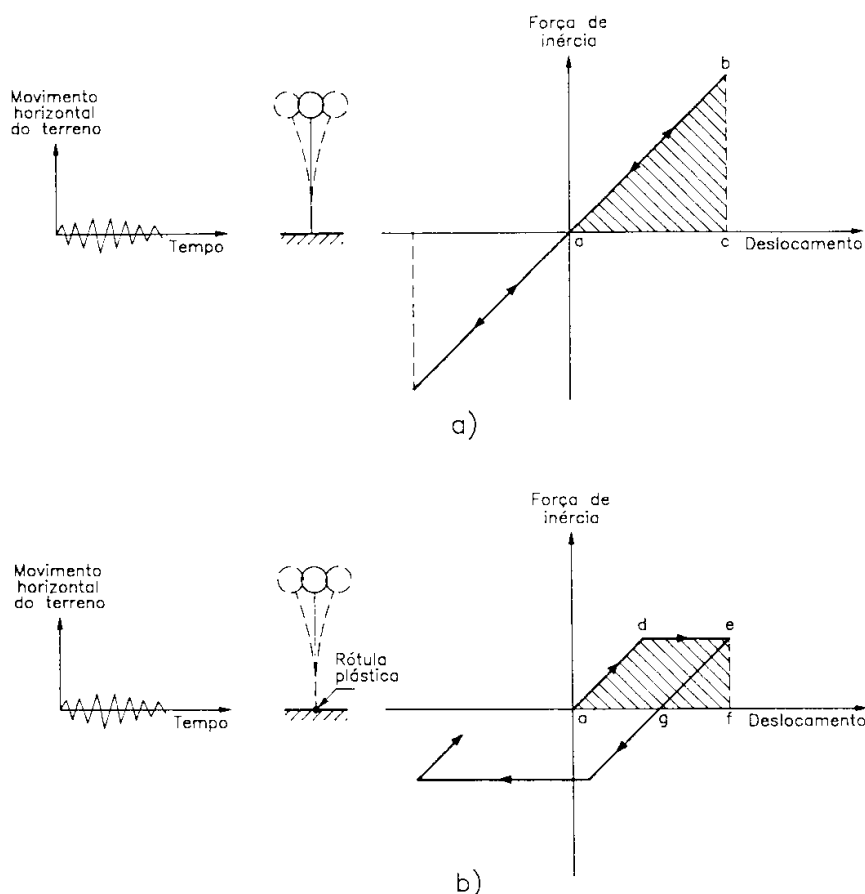


Figura 27 - Resposta de um oscilador à ação de um sismo.
a) Resposta elástica e b) Resposta elastoplástica (Pipa, M., 1993)

Através da Figura 28 (Pipa, M., 1993) exemplifica o comportamento elastoplástico podendo observar-se que uma estrutura dimensionada para uma força de um terço da que estaria sujeita se respondesse elasticamente, sofrerá uma deformação total de três vezes a sua deformação de cedência. Simplificadamente, o autor (Pipa, M., 1993) refere que este comportamento corresponde, de acordo com o considerado pela regulamentação em vigor à data do estudo, à adoção de um coeficiente de comportamento (η) para esforços de três e um coeficiente de comportamento para deformações (μ) de um.

Assim, se a ductilidade for aferida em termos da relação entre o deslocamento máximo e o deslocamento de cedência $\mu = \delta / \delta_y$, a Figura 28 permite concluir que $\mu = \eta$.

Portanto o estudo desenvolvido por Pipa (Pipa, M., 1993), refere que a capacidade que as estruturas possuem para se deformar para além do limite elástico sem perda de resistência influencia diretamente a redução a adotar para os esforços de dimensionamento devido à ação sísmica obtidos em regime elástico. Mais, o autor salienta que a redução dos esforços poderá ser tanto maior quanto maior for a ductilidade que a estrutura dispõe, sendo em primeira análise de admitir que, quanto maior for a redução, mais económica será a estrutura.

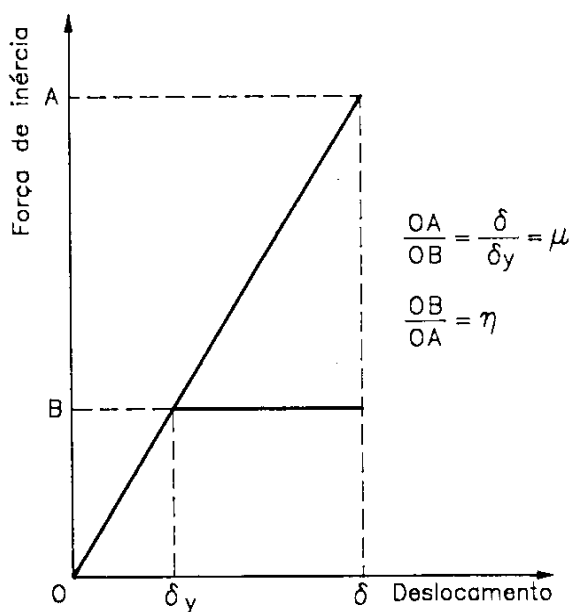


Figura 28 - Resposta de uma estrutura elástica e de uma estrutura elastoplástica admitindo igualdade de deslocamento máximo (Pipa, M., 1993)

Na perspetiva de que as estruturas e os seus elementos devem apresentar comportamentos tão dúcteis quanto possível, de modo a que possam responder adequadamente à ação de um sismo, deve-se limitar a influência na resposta de mecanismos de deformação à partida pouco dúcteis, como é por exemplo, o comportamento dos elementos condicionados por esforço transversal.

Assim, para se assegurar que tal não acontece, no dimensionamento é necessário tomar medidas que garantam que a capacidade resistente última dos elementos em termos de esforço transversal é superior à respetiva capacidade resistente última em termos de flexão, combinada ou não com esforço normal, possibilitando desta forma que as rótulas plásticas que se formem, quando tal capacidade é atingida, não sofram a influência do esforço transversal (Pipa, M., 1993).

No entanto, para que seja possível efetuar um dimensionamento deste tipo (*capacity design*) é necessário adotar regras estratégicas que passam por ter em conta a resistência efetiva dos elementos em termos dos seus valores médios mais prováveis. Como tal pode ser

complexo, simplifica-se o processo de dimensionamento, não fazendo intervir diretamente os valores resistentes médios dos elementos, e utilizam-se coeficientes de sobre resistência aplicados aos valores dos esforços resistentes de cálculo, que correspondem a resistências minoradas através de coeficientes de segurança aplicados às propriedades dos materiais (Pipa, M., 1993).

Desta forma, demonstra-se que é de enorme relevância o controlo das propriedades dos materiais, em particular das características das armaduras de aço para betão estrutural. Portanto, nas secções seguintes apresenta-se em traços gerais o processo de garantia da qualidade das armaduras de aço para betão implementado em Portugal (secção 4.4) e aborda-se o processo de avaliação das incertezas de medição associada à determinação da propriedade, extensão total na força máxima, das armaduras que condicionam o desempenho dos elementos estruturais (secção 4.5).

4.4. GARANTIA DA QUALIDADE DAS ARMADURAS PARA BETÃO ARMADO

4.4.1. GENERALIDADES

As estruturas de betão armado continuam a representar a larga maioria das obras construídas no país pelo que os aços para betão armado empregues, têm um papel primordial na segurança das obras. Portanto, é necessária atenção particular à questão da garantia da qualidade destes produtos já que dessa garantia vai depender a confiança na segurança da maior parte das infraestruturas.

Os sistemas de garantia da qualidade dos aços para betão diferem de país para país e, de modo geral, têm a ver com a sua própria história. Em termos genéricos estes sistemas têm por base documentos normativos complementados por sistemas de certificação. Em Portugal o sistema de garantia da qualidade dos aços para betão armado, teve importantes desenvolvimentos no final da década de 90 do século passado, podendo assegurar-se que é hoje em dia um sistema abrangente e de grande credibilidade (Louro, A. et al, 2002).

4.4.2. PROCEDIMENTO DE CONTROLO DE CONFORMIDADE DE PRODUTO

Em Portugal, a atividade de certificação de aços para betão armado foi iniciada em 1992 pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), com a colaboração do LNEC, que a pedido voluntário de alguns produtores portugueses, passou a conceder a Licença para Uso da Marca Produto Certificado.

Atualmente em Portugal com a publicação, em 1999, do Decreto-Lei n.º 128/99 (Decreto-Lei n.º 128, 1999), de 21 de abril (referente a aço para armaduras de betão armado), em 2007, do Decreto-Lei n.º 28/07, de 12 de fevereiro (Decreto-Lei n.º 28, 2007) (referente a aço para armaduras de betão pré-esforçado) e do Decreto-Lei n.º 390/07 (Decreto-Lei n.º 390, 2007), de 10 de dezembro, é obrigatória a certificação de todos os produtos de aço para utilização em armaduras para a construção em betão armado e pré-esforçado, o que complementa as disposições previstas no artigo 23.º do REBAP (Decreto-Lei n.º 349-C, 1983), relativas à obrigação de classificação dos varões de aço para betão armado.

Relativamente aos produtos de aço para construção, como referido anteriormente, não existem ainda normas harmonizadas (que implementem a marcação CE), nem aprovações

técnicas europeias, pelo que as especificações LNEC servem como documentos de referência para a elaboração dos procedimentos de certificação dos produtos de aço para construção. Desta forma, os produtos que satisfaçam as disposições nacionais relativas à certificação obrigatória podem ser colocados no mercado, embora sem marcação CE.

Deste modo, para colocar no mercado armaduras para betão armado é necessário obter o Documento de Classificação e a Licença para Uso da Marca Produto Certificado. Para comercializar os restantes produtos alvo de Normas ou Especificações LNEC, apenas é necessário obter a Licença para Uso da Marca Produto Certificado (Louro, A. et al, 2006).

Por fim, com a entrada em vigor da Norma Portuguesa (NP ENV 13670-1, 2007) e com a publicação do Decreto-Lei 301/07, de 23 de agosto (Decreto-Lei n.º 301, 2007), tornou-se obrigatório para as estruturas objeto das classes de inspeção 2 e 3 estabelecidas na (NP ENV 13670-1, 2007), a aceitação das armaduras de aço, também pelo utilizador, através da inspeção e dos ensaios de receção previstos na (NP ENV 13670-1, 2007), feitos em laboratórios acreditados. Neste caso, a amostragem pode ser efetuada no local da entrega destes produtos na obra, pelo produtor sob controlo do utilizador. Para as estruturas objeto da classe de inspeção 1, os ensaios de receção apenas são obrigatórios se estiverem definidos nas especificações de projeto, podendo sempre ser solicitados pelo utilizador ou pelas entidades de supervisão (diretor técnico da obra ou entidade fiscalizadora), em caso de dúvida sobre a conformidade das armaduras com as disposições específicas da (NP ENV 13670-1, 2007). Este controlo suplementar visa melhorar a qualidade dos produtos de aço aplicados em obra, funcionando como uma medida preventiva de modo a diminuir a probabilidade de ser aplicado um material com propriedades fora dos limites especificados.

4.4.3. CERTIFICAÇÃO

O procedimento utilizado atualmente em Portugal para a certificação de armaduras para betão armado não difere muito daquele previsto na marcação CE, já que a norma em desenvolvimento (prEN 10080, 2015) especifica um sistema de avaliação da conformidade para a marcação CE do tipo 1+, que é o sistema mais exigente. Neste sistema existem as figuras do controlo interno e do controlo externo com vista à emissão de um certificado de conformidade do produto. As principais diferenças entre o exigido em Portugal e o previsto no (prEN 10080, 2015) incidem na amostragem a submeter a ensaio (número de provetes, vazamentos e diâmetros envolvidos) para os controlos de concessão e de acompanhamento e também no próprio tipo de ensaios a realizar.

Portanto, de um modo geral, pode dizer-se que a atribuição da licença para uso da marca produto certificado é feita de acordo com procedimentos elaborados com base em normas europeias que preveem a execução de ensaios realizados, em paralelo, pelo fabricante e por um laboratório externo acreditado e a análise do controlo interno da produção do fabricante com vista à sua validação (PE.PSG.01 Ed. 7, 2009) (PE.PSG.06 Ed. 9, 2013) (PE.PSG.10 Ed. 5, 2013).

O processo de certificação engloba assim, as seguintes fases: Concessão e Acompanhamento.

A fase de concessão é iniciada quando o fabricante solicita, à entidade certificadora, a certificação do seu produto. Esta entidade realiza então uma auditoria em que, para além de serem verificadas as condições de fabrico e de controlo interno da produção, é realizada uma recolha de amostras. Sendo a unidade de inspeção o vazamento, é então recolhido um determinado número de amostras de um número predefinido de vazamentos. As amostras são recolhidas em duplicado (provetes contíguos) para serem ensaiadas pelo fabricante e por um laboratório externo acreditado (ensaio de concessão).

Cada amostra contém os provetes necessários para a realização dos ensaios descritos no Quadro 7 que visam caracterizar o produto e atestar a sua conformidade com as especificações LNEC aplicáveis.

Quadro 7 - Ensaio realizado na concessão da certificação a varões de aço para betão armado
 (PE.PSG.01 Ed. 7, 2009) (PE.PSG.06 Ed. 9, 2013) (PE.PSG.10 Ed. 5, 2013)

CONCESSÃO								
Produto	Amostragem		Número de ensaios por tipo					
	Diâmetros	Vazamentos	Tração	Dobragem/Dobragem-desdobragem	Medição de nervuras	Det. composição química	Cíclicos alternados	Fadiga
A400 NR	3	2	6 x 10	6 x 10	6 x 10	6 x 1	-	-
A500 NR	3	2	6 x 10	6 x 10	6 x 10	6 x 1	-	-
A400 NR SD	3	3	9 x 10	9 x 10	9 x 10	9 x 1	9 x 1	9 x 1
A500 NR SD	3	3	9 x 10	9 x 10	9 x 10	9 x 1	9 x 1	9 x 1
A500 ER	2	2	4 x 10	4 x 10	4 x 10	4 x 1	-	-

Os resultados dos ensaios realizados num laboratório externo acreditado são analisados e comparados com os resultados obtidos pelo fabricante, com objetivo de verificar a conformidade do produto e despistar erros sistemáticos que possam ocorrer nos ensaios de controlo interno da produção, realizados pelo fabricante.

A Unidade de Produtos Metálicos (UPM) do LNEC-EM é atualmente o laboratório externo acreditado que realiza os ensaios preconizados e o LNEC emite um parecer técnico no qual se apresentam e analisam os resultados obtidos por ambas as partes envolvidas, se identificam as principais anomalias do produto, se apresentam as diferenças nos resultados obtidos nos ensaios realizados pelas duas entidades e se propõem as medidas preventivas e/ou corretivas a implementar.

A entidade certificadora, com base no referido parecer e nos resultados da auditoria por si realizada, decide então a concessão, ou não, da Licença para o Uso da Marca Produto Certificado. Caso seja atribuída a licença, o fabricante entrará na fase de acompanhamento, caso contrário, é agendada uma nova colheita de amostras e o processo repete-se.

Após a concessão da certificação, os fabricantes de produtos de aço para betão armado entram, como foi referido anteriormente, num acompanhamento semestral (PE.PSG.01 Ed. 7, 2009) (PE.PSG.06 Ed. 9, 2013) (PE.PSG.10 Ed. 5, 2013).

Portanto, no caso dos varões de aço para betão armado, é realizada semestralmente uma auditoria em que, para além de ser verificada a manutenção ou melhoria das condições de fabrico e de controlo interno da produção, é realizada uma nova recolha de amostras em duplicado para serem ensaiadas pelo fabricante e por um laboratório externo acreditado (ensaios de acompanhamento).

A amostragem e os ensaios realizados na fase de acompanhamento são os descritos no Quadro 8.

Nesta fase, o parecer técnico do LNEC é baseado, não só na avaliação dos resultados obtidos nos ensaios de acompanhamento, mas também na análise do controlo interno da produção realizada pelo fabricante.

Quadro 8 - Ensaios realizados no acompanhamento da certificação a varões de aço para betão armado
(PE.PSG.01 Ed. 7, 2009) (PE.PSG.06 Ed. 9, 2013) (PE.PSG.10 Ed. 5, 2013)

ACOMPANHAMENTO								
Produto	Amostragem		Número de ensaios por tipo					
	Diâmetros	Vazamentos	Tração	Dobragem/Dobragem-desdobragem	Medição de nervuras	Det. composição química	Cíclicos alternados	Fadiga
A400 NR	1	1	1 x 10	1 x 10	1 x 10	1 x 1	-	-
A500 NR	1	1	1 x 10	1 x 10	1 x 10	1 x 1	-	-
A400 NR SD	2	1	2 x 10	2 x 10	2 x 10	2 x 1	2 x 1	2 x 1
A500 NR SD	2	1	2 x 10	2 x 10	2 x 10	2 x 1	2 x 1	2 x 1
A500 ER	1	1	1 x 10	1 x 10	1 x 10	1 x 1	-	-

O controlo interno da produção é efetuado, realizando um certo número de ensaios com uma incidência pré-definida de acordo com o material em causa. Trimestralmente, são calculados parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e os valores característicos

mínimo e máximo) dos resultados obtidos e, no caso dos varões de aço, são semestralmente analisados pelo LNEC.

Com base na análise destes dois elementos, o LNEC emite o seu parecer que pode, em geral, ter três conclusões diferentes. Pode confirmar a conformidade do produto e assim, a continuidade da Licença para o Uso da Marca Produto Certificado. Pode sugerir que, devido a anomalias detetadas no produto ou na realização dos ensaios, seja reforçado o controlo de acompanhamento (este reforço é realizado duplicando a amostragem de acompanhamento numa próxima auditoria). Por último pode ainda, e no caso de já terem sido realizados controlos reforçados, sem melhoria considerável da produção e/ou sem evidências de melhoria da proficiência para execução dos ensaios, ser sugerida a suspensão da Licença para o Uso da Marca Produto Certificado.

4.4.4. ENSAIOS DE RECEÇÃO

Para além da certificação, os varões de aço para betão armado podem ainda ser sujeitos a ensaios de receção.

Como se viu anteriormente, a certificação permite ao fabricante atestar perante o mercado a eficácia do controlo interno da qualidade dos produtos implementado na sua unidade de produção e ao cliente ter a garantia que o processo de fabrico foi auditado por uma entidade externa independente, e que, estatisticamente, a produção cumpre o especificado em normas ou outros documentos técnicos.

No entanto, não é possível assegurar que todo o produto certificado colocado em obra cumpre as exigências mínimas, já que os requisitos especificados para o controlo interno e externo nos procedimentos de certificação aplicam-se a uma amostragem aleatória da produção e não a toda a produção.

Os procedimentos de certificação visam assim assegurar o cumprimento dos valores característicos que representam um percentil. As Especificações LNEC (Especificação E 449, 2010) (Especificação E 450, 2010) (Especificação E 455, 2010) (Especificação E 460, 2010) (Especificação E 456, 2011), o (prEN 10080, 2015) e o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2012) definem que a média dos valores individuais deve exceder o valor característico mais um parâmetro positivo que depende da propriedade, e limitam o desvio por defeito dos valores individuais em relação ao valor característico (Moreira, C. et al, 2008).

Sabe-se também que todas as estruturas devem cumprir, com um grau apropriado de fiabilidade (capacidade de uma dada estrutura, em determinadas condições, cumprir os requisitos essenciais para os quais foi projetada, durante um período de tempo de referência), requisitos essenciais de resistência e funcionalidade. A filosofia atual de dimensionamento de estruturas consiste em assegurar os requisitos essenciais através da verificação de vários Estados Limites, expressos por via de modelos simples que incluem variáveis (ações, propriedades materiais, propriedades geométricas) definidas por valores característicos, sendo-lhes aplicados fatores de segurança para ter em conta, no caso dos materiais, entre outros fatores, a possibilidade de um desvio desfavorável (interpretado como uma variação aleatória) das propriedades do material em relação aos valores característicos (Moreira, C. et al, 2008).

No caso do aço para armaduras de betão armado, o coeficiente de segurança previsto vale 1,15. Este valor foi definido no Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2012) a partir de um coeficiente de variação da resistência do aço igual a 4% e um índice de fiabilidade igual a 3,8. Portanto, se o aço a aplicar em obra apresentar uma dispersão superior a 4%, é possível manter a probabilidade de rotura da estrutura idealizada no regulamento, se forem adotadas medidas como:

- A redução de outras fontes de incerteza;
- O aumento do coeficiente de segurança aplicado ao material;
- A redução do tempo de vida útil da estrutura.

Estes factos levam a que se adotem medidas preventivas durante a receção em obra dos materiais de construção, reduzindo a probabilidade de ser aplicado em obra um material com propriedades fora dos limites especificados.

Neste sentido foi publicada em 2007 pelo IPQ, a norma Portuguesa (NP ENV 13670-1, 2007). Esta norma, que se insere num quadro normativo mais vasto representado na Figura 29, estabelece o nível de execução requerido quando se ligam materiais tais como betão fresco e armaduras, numa estrutura que atinge o nível de resistência mecânica e estabilidade pretendido (Moreira, C. et al, 2008).

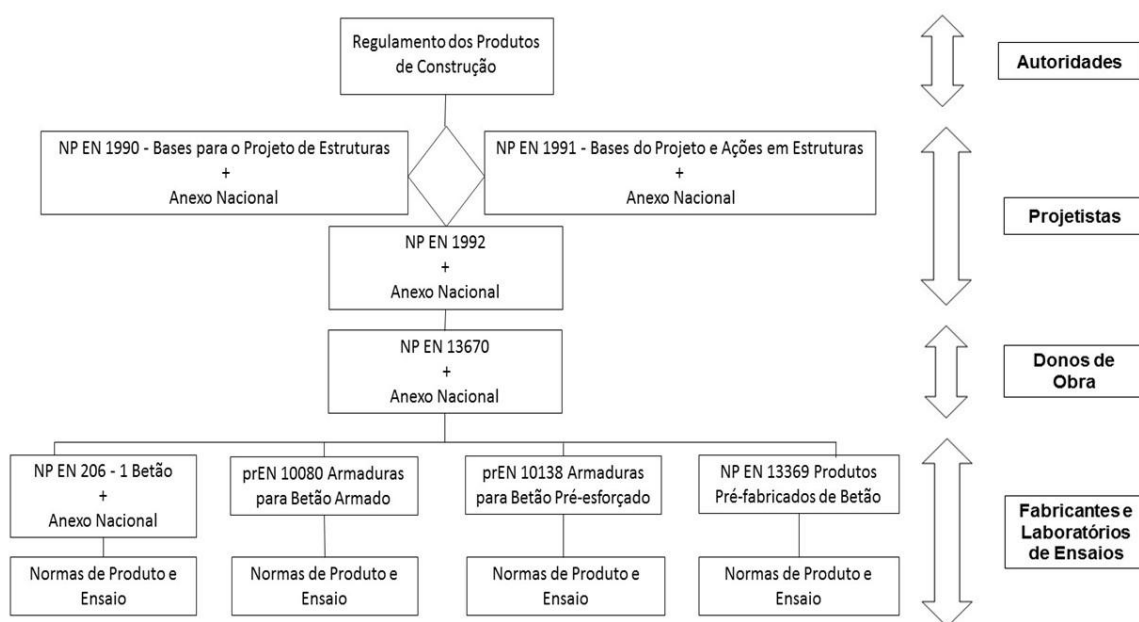


Figura 29 - Regulamento dos produtos de construção
(adaptado de: Moreira, C. et al, 2008)

A norma (NP ENV 13670-1, 2007), estabelece, na sua secção 11, três classes de inspeção (classe de inspeção 1, 2 e 3), e os seus requisitos. Pretende-se com a inspeção assegurar que as obras são executadas em conformidade com norma (NP ENV 13670-1, 2007) e com as disposições das especificações de projeto (documentos elaborados pelo projetista, nas quais devem constar a descrição de todos os produtos a utilizar e quaisquer requisitos para a sua aplicação, em particular as classes de inspeção a considerar, a definição do

responsável pela inspeção, os ensaios de receção de produtos sem Marcação CE ou certificação por entidade independente). O Quadro 9 apresenta o guia para a seleção das classes de inspeção (Moreira, C. et al, 2008).

Quadro 9 - Guia para a seleção das classes de inspeção (NP ENV 13670-1, 2007)

Item	Classe de inspeção 1	Classe de inspeção 2	Classe de inspeção 3
Tipo de construção	– Edifícios ≤ 2 andares	– Pontes correntes – Edifícios > 2 andares	– Pontes especiais – Edifícios de grande altura – Grandes barragens – Edifícios para centrais nucleares – Reservatórios
Tipo de elementos estruturais	– Lajes e vigas em betão armado com vãos < 10 m – Pilares e paredes simples – Estruturas de fundações simples	– Lajes e vigas em betão armado com vãos > 10 m – Pilares e paredes esbeltos – Maciços de encabeçamento de estacas – Arcos < 10 m	– Elementos fortemente comprimidos – Fundações delicadas e complicadas – Arcos > 10 m – Arcos e abóbadas em betão armado
Tipo de construção / tecnologias usadas	– Estruturas com elementos prefabricados	– Estruturas com elementos prefabricados	– Estruturas com elementos prefabricados – Tolerâncias especiais
Tipo de materiais em obra: Betão conforme a EN 206:			
– Classe de resistência	Até C25/30 inclusive	Qualquer classe de resistência	Qualquer classe de resistência
– Classe de exposição	X0; XC1, XC2, XA1, XF1	Qualquer classe de exposição	Qualquer classe de exposição
– Armaduras	Passivas	Passivas e de pré-esforço	Passivas e de pré-esforço

Com a publicação do Decreto-Lei 301/07, de 23 de agosto (Decreto-Lei n.º 301, 2007), tornou-se obrigatório para as estruturas objeto das classes de inspeção 2 e 3 estabelecidas na norma (NP ENV 13670-1, 2007), a aceitação das armaduras de aço, também pelo utilizador, através da inspeção e dos ensaios de receção previstos pela norma, feitos em laboratórios acreditados, podendo a amostragem ser efetuada, no local da entrega destes produtos na obra, pelo produtor sob controlo do utilizador.

Portanto, qualquer produto de aço para betão armado que seja colocado em obra deve ser entregue com uma guia de remessa, o certificado do produtor ou o relatório dos ensaios efetuados pelo produtor correspondente ao aço fornecido, o Documento de Classificação emitido pelo LNEC e, a Licença para o Uso da Marca Produto Certificado.

Para além destes documentos, podem ser necessários ensaios de receção a realizar em laboratório acreditado (de acordo com a (NP ENV 13670-1, 2007)). Nesse caso devem ser constituídos lotes (divisão do fornecimento constituída por, simultaneamente, provir do

mesmo produtor e ser do mesmo tipo de aço) dos quais são retiradas amostras para a realização dos ensaios obrigatórios (tração, geometria das nervuras, corte das soldaduras). Os resultados obtidos devem satisfazer os valores prescritos nas Especificações LNEC aplicáveis.

O número mínimo de amostras a colher em cada lote e as dimensões, conforme indicado na norma (NP ENV 13670-1, 2007), é a seguinte: para as armaduras de aço para betão armado será 1 amostra por cada 50 toneladas.

No Quadro 10 indicam-se as propriedades das armaduras de aço a verificar na receção por meio de ensaios sobre provetes cortados de cada amostra, e o número destes provetes.

Quadro 10 - Ensaios de receção (NP ENV 13670-1, 2007)

Propriedades / características	Armaduras para betão armado	
	Varões	Redes eletrossoldadas
Mecânicas (incluindo ductilidade)	2	1 em cada direção
Aderência (geometria das nervuras)	1	1 em cada direção
Resistência ao corte da soldadura	-	1

Após os ensaios, se para uma determinada propriedade se obtiver um valor não conforme, a amostragem deve ser repetida com o dobro das amostras. Caso se repita algum resultado não conforme, o lote deve ser rejeitado.

O projetista pode também elaborar especificações de projeto exigindo ensaios de receção tendo em vista a caracterização de outras propriedades (por exemplo, a fadiga). Nesse caso, as especificações de projeto devem explicitar o método de ensaio, o plano de amostragem e os critérios de aceitação.

4.5. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

4.5.1. INTRODUÇÃO

A avaliação da conformidade reúne o conjunto de atividades associadas à verificação do cumprimento dos requisitos contidos em documentação normativa ou técnica de referência nos contextos produtivos e operacionais onde produtos, sistemas e serviços estão inseridos. Torna-se assim possível evidenciar que estes elementos possuem as características necessárias à sua utilização de forma satisfatória, garantindo a sua repetibilidade e reprodutibilidade.

De cada avaliação realizada resulta uma decisão de aceitação ou rejeição do item ou lote inspecionado, a qual é frequentemente suportada em resultados de medições de diferentes domínios (dimensional, geométrico, térmico, entre outros). De forma a minimizar a possibilidade da tomada de uma decisão errada, é fundamental conhecer as incertezas de medição das estimativas obtidas, as quais quantificam o nível de exatidão das medições efetuadas nos processos de avaliação de conformidade. Deste modo, um dado item sujeito

a avaliação de conformidade é considerado aceitável caso o resultado da medição (estimativa e incerteza) estiver contido no intervalo indicado na respetiva documentação normativa ou técnica aplicável, em regra, expresso por um valor nominal e um intervalo de variação permitida (Ribeiro, A., Martins, L., 2009).

4.5.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE MEDIÇÃO

Na evolução histórica do conceito de medição é possível identificar duas perspetivas distintas: a clássica e a contemporânea. A perspetiva clássica admite que o valor verdadeiro da grandeza, V_v , e o valor da medição V_m podem ser conhecidos, determinando o erro de medição, conforme representado na Figura 30, onde ε é definido como o erro absoluto da medição. Contudo, atendendo à impossibilidade de se conhecer o valor verdadeiro da grandeza, é igualmente impossível conhecer o erro da medição.

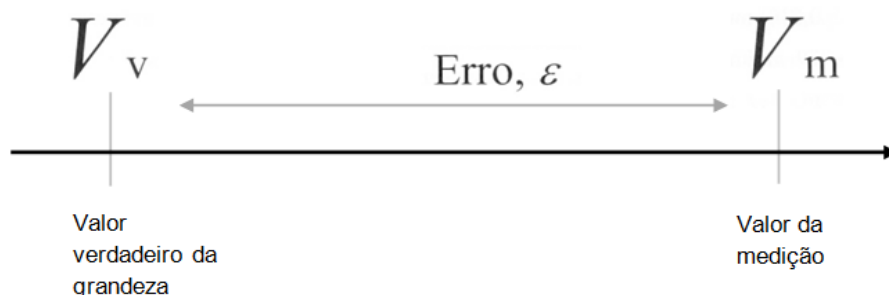


Figura 30 - Perspetiva clássica do conceito de medição (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

Na perspetiva moderna do conceito de medição é promovida a substituição do valor verdadeiro da grandeza pelo valor convencional V_c , que se define como o valor atribuído a uma grandeza particular e aceite, por vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada a um determinado objetivo, conforme representado na Figura 31 (IPQ, 2012). Deste modo, a definição de erro é mantida num plano conceptual sendo substituída, na prática, pelo desvio δ , definido como a diferença entre o valor de medição e o valor convencional da grandeza mensurável.

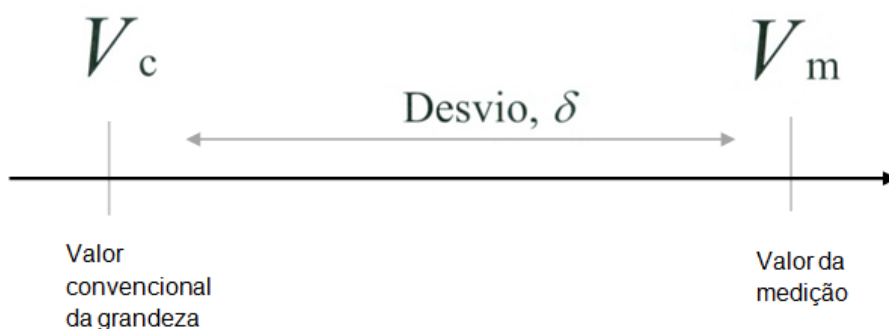


Figura 31 - Perspetiva moderna do conceito de medição (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

A perspetiva contemporânea de medição pressupõe que o valor verdadeiro de uma grandeza mensurável não se pode atingir através da medição, pois a medição é imperfeita pelos seguintes factos:

- A concretização real dos sistemas de medição não realiza de forma perfeita o modelo conceptual;
- Os instrumentos e sistemas de medição possuem limitações intrínsecas como, por exemplo, a sua resolução finita;

No decorrer de um processo de medição, efetuado num determinado período de tempo, ocorre a variação de condições que influenciam a medição (por exemplo, de natureza ambiental como a temperatura e a humidade relativa).

Na prática, a natureza sistemática do erro de medição é quantificada pelo desvio, ao qual se associa os efeitos de natureza aleatória do erro, os quais são expressos pela incerteza de medição representativa da dispersão de valores associada à medição da grandeza de interesse. O valor convencional da grandeza constitui, deste modo, uma curva de referência cuja dispersão de valores associados é menor do que a dispersão de valores associada à medição, conforme representado na Figura 32.

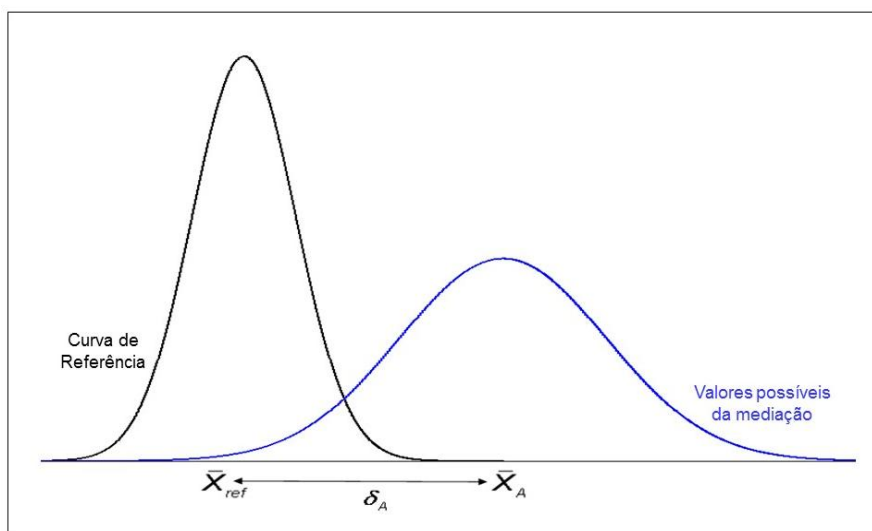


Figura 32 - Desvio e incerteza de medição (adaptado de: Relatório 331 - DE/NCE, 2009)

4.5.3. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDICAÇÃO

O VIM (IPQ, 2012) define a incerteza de medição como o parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensuranda, traduzindo efeitos sistemáticos e aleatórios decorrentes do processo de medição nas vertentes instrumental, do método e do operador, este último quando este intervém de forma significativa na medição. Deste modo, a incerteza de medição quantifica a qualidade da medição realizada, expressando a sua exatidão, suportando uma base comparativa entre medições realizadas por diferentes métodos, instrumentos e operadores, em locais e instantes de tempo distintos.

Define-se probabilidade como uma descrição quantitativa da verosimilhança, plausibilidade ou grau de convicção acerca de uma determinada proposição, que o valor de uma quantidade se encontra, por exemplo, no interior de um determinado intervalo. O grau de convicção depende do estado do conhecimento sobre a proposição, que por sua vez, é

construída com base em todas as informações disponíveis sobre a quantidade adquiridas de forma direta por medição ou de forma indireta com base em conhecimento prévio.

Tendo em conta esta definição de probabilidade, o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (IOS, 2008) indica que a incerteza do resultado de uma medição consiste geralmente de várias componentes que podem ser agrupadas em duas categorias, de acordo com a maneira como os seus valores numéricos são estimados:

- Tipo A, valores numéricos estimados por métodos estatísticos;
- Tipo B, valores numéricos estimados por outros meios.

Para ambos os casos, a avaliação da incerteza é realizada com base em distribuições estatísticas sendo as componentes da incerteza quantificadas através das respetivas variâncias ou desvios-padrão.

Numa componente de incerteza do Tipo A, a incerteza padrão é calculada através de uma distribuição de observações em condições de repetibilidade, isto é, num conjunto de condições em que se incluem o mesmo procedimento de medição, operador, sistema de medição e condições operacionais.

Numa componente de incerteza do Tipo B, a incerteza padrão é obtida através de uma função densidade de probabilidade assumida inicialmente, definida com base na experiência adquirida e na informação disponível (certificados de calibração ou ensaio do equipamento utilizado, por exemplo).

A função densidade de probabilidade adotada para uma determinada componente de incerteza não descreve de modo completo a realidade da medição mas apenas o nosso estado do conhecimento sobre essa realidade. Após definir uma dada função densidade de probabilidade, em regra, apenas é necessário obter dois parâmetros: o valor esperado e o respetivo desvio-padrão (ou a variância). Em particular, o desvio padrão caracteriza a dispersão dos valores em relação à média, pelo que se convencionou ser este o parâmetro que melhor descreve a incerteza de uma medição.

No caso de grandezas obtidas por via indireta, isto é, mediante aplicação de um modelo matemático suportado num conjunto de grandezas (de entrada), é necessário efetuar a propagação das respetivas incertezas até à grandeza final (de saída). De acordo com o GUM (IOS, 2008), nos casos em que o modelo matemático é linear ou ligeiramente não-linear, a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas (LPI) é particularmente adequada ao cálculo da incerteza padrão combinada da grandeza de interesse.

Note-se que, num processo de tomada de decisão como, por exemplo, numa avaliação da conformidade, é exigido um intervalo de valores possíveis para a mensuranda, associado a uma probabilidade de expansão relativamente elevada, isto é, com um nível de confiança elevado. Para tal, o GUM recomenda a multiplicação da incerteza padrão por um dado fator de expansão dando origem ao que se designa por incerteza de medição expandida (IOS, 2008).

4.5.3.1. Incerteza de medição padrão

Uma das funções densidade de probabilidade mais usuais no contexto da avaliação de incertezas de medição corresponde à distribuição normal ou gaussiana (Figura 33), já que apresenta propriedades interessantes do ponto de vista metrológico. Uma delas reside no facto de que, se uma quantidade for medida repetidamente, as grandezas de influência, que variam aleatoriamente de leitura para leitura, produzem erros aleatórios cuja distribuição da frequência pode ser aproximada por uma função densidade de probabilidade normal com valor esperado nulo. Esta propriedade é utilizada, por exemplo, na quantificação de incertezas de medição do Tipo A (IOS, 2008) (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

A função normal é dada pela seguinte expressão:

$$p(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu_t}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4)$$

em que μ_t representa o valor esperado e σ corresponde ao desvio padrão.

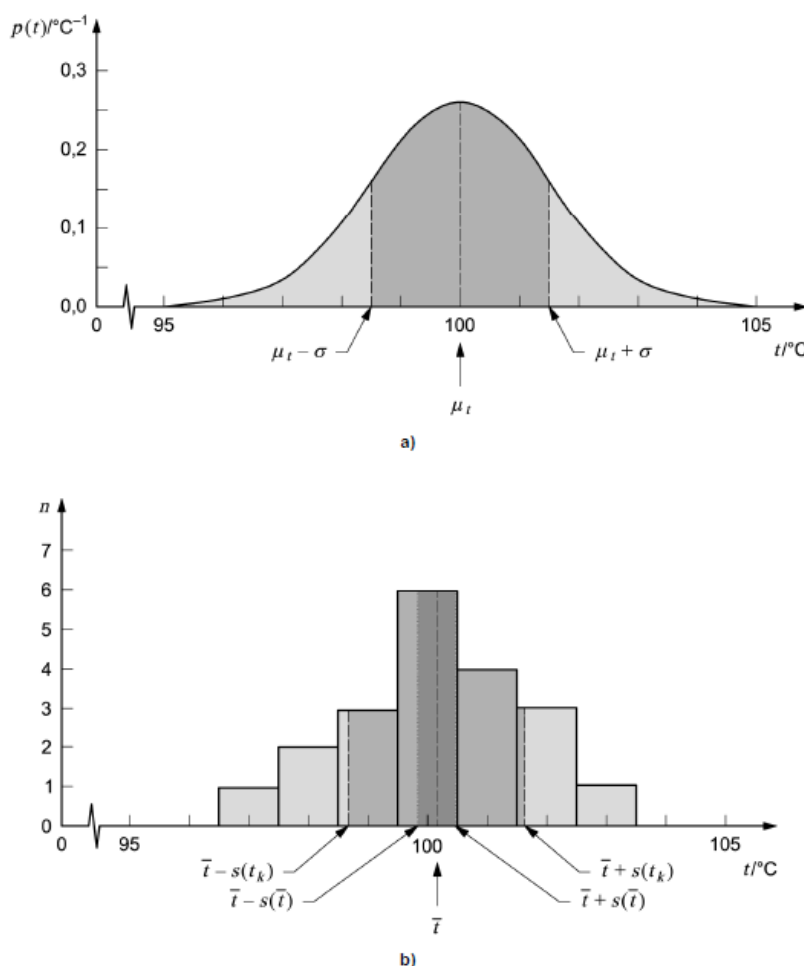


Figura 33 - Distribuição normal (IOS, 2008)

Uma vez que só dispondo de um conjunto infinito de medições da mesma grandeza se consegue obter o valor do desvio padrão da população, o GUM (IOS, 2008) possibilita a

simplificação do processo de determinação da incerteza do Tipo A, ao determiná-la a partir de uma amostra em vez da população. Em regra, esta amostra é caracterizada pelo seu valor médio \bar{x} dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (5)$$

em que n corresponde à dimensão da amostra e x_k são os valores medidos que compõem a amostra, e pelo respetivo desvio padrão experimental, s_x , dado por:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \mu)^2} \quad (6)$$

O desvio padrão experimental, s_x , constitui uma estimativa imparcial do desvio padrão da população, σ_x , pelo que é considerado como uma indicação quantitativa da exatidão da amostra. Seria razoável associar o valor da incerteza padrão de um dos valores x_i se esse valor fosse determinado como a estimativa da quantidade. Mas, como é sabido, a estimativa da quantidade é dada pelo valor esperado, isto é, \bar{x} , pelo que a incerteza padrão u_x é dada pelo desvio padrão experimental da média, ou seja:

$$u_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Note-se que esta aproximação só é válida se a função densidade de probabilidade seguir uma distribuição normal, ou seja, para um número elevado de observações ($n \geq 10$).

Por vezes só é possível estabelecer os limites superior (a_+) e inferior (a_-) de uma componente de incerteza, isto é, a probabilidade do valor x estar compreendido entre a_- e a_+ é igual a 1, não havendo conhecimento sobre a probabilidade de x tomar qualquer um dos valores compreendidos entre a_- e a_+ , correspondendo a uma distribuição retangular ou uniforme (Figura 34). Esta é uma das situações que se enquadra numa avaliação de incerteza do Tipo B (IOS, 2008).

Na distribuição retangular ou uniforme, a variância é dada por:

$$u^2(x) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (8)$$

ou, no caso de a distribuição ser concentrada, isto é, $a_+ - a_- = 2a$, obtém-se:

$$u^2(x) = \frac{a^2}{3} \quad (9)$$

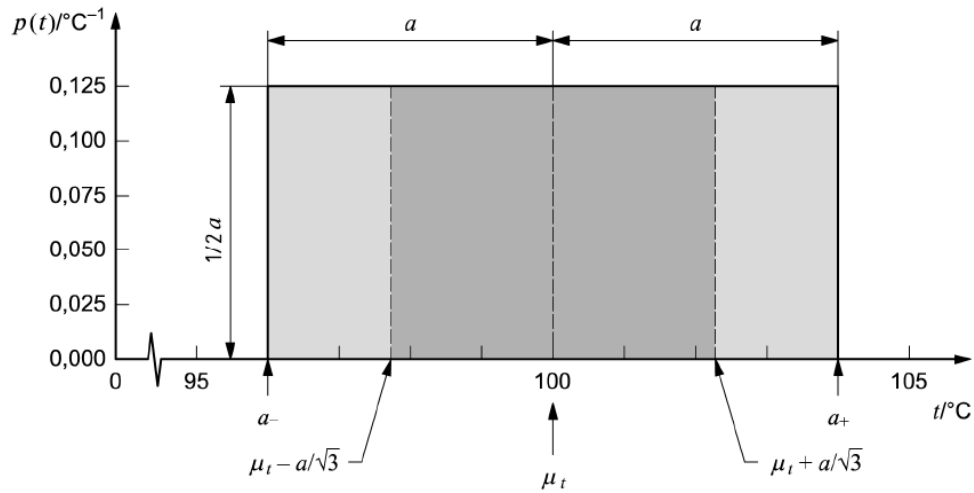


Figura 34 - Distribuição retangular ou uniforme (IOS, 2008)

Em determinados casos é possível constatar que valores mais próximos da média têm maior probabilidade de acontecerem do que os restantes podendo admitir-se, por exemplo, uma distribuição triangular, conforme representado na Figura 35. Neste caso, a variância é dada pela seguinte expressão:

$$u^2(x) = \frac{a^2}{6} \quad (10)$$

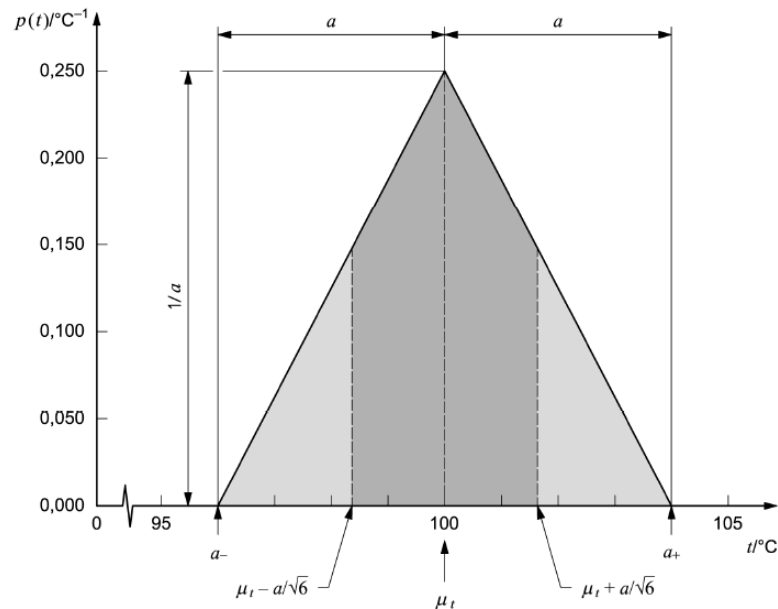


Figura 35 - Distribuição triangular (IOS, 2008)

4.5.3.2. Lei da Propagação de Incertezas

A mensuranda (Y) pode ser determinada por via indireta mediante outras N quantidades (grandezas de entrada) $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, relacionadas por uma função f , em que:

$$Y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (11)$$

Nos casos em que a função f é linear ou ligeiramente não-linear, a incerteza associada à estimativa y da mensuranda Y pode ser obtida combinando, de modo apropriado, as incertezas padrão de cada uma das grandezas de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, de acordo com a Lei da Propagação de Incertezas (LPI). A adoção da LPI pressupõe a validade do Teorema do Limite Central, o qual permite afirmar que a distribuição das médias de um conjunto de variáveis aleatórias com uma qualquer distribuição é aproximadamente normal (IOS, 2008) (Relatório 331 - DE/NCE, 2009).

A LPI determina que a variância da estimativa da grandeza de saída, $u_c^2(y)$ seja obtida (não contabilizando eventuais efeitos de correlação entre grandezas de entrada) com base na combinação das variâncias das estimativas das grandezas de entrada $u^2(x_i)$ através da expressão:

$$u_c^2(y) \approx \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (12)$$

onde as derivadas parciais $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ adotam a designação de coeficientes de sensibilidade, c_i , ou seja:

$$u_c^2(y) \approx \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 \quad (13)$$

Conforme preconizado no GUM, assume-se que são aplicadas correções para cada um dos efeitos sistemáticos detetados que afetem, de modo significativo, o resultado da medição. A incerteza de medição associada a uma correção contribui para a dispersão de valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensuranda (IOS, 2008).

4.5.3.3. Incerteza de medição expandida

Determinada a incerteza padrão da estimativa y da mensuranda Y , o GUM (IOS, 2008) recomenda que seja explicitado um intervalo à volta do resultado da medição que esteja associado a um nível de confiança elevado, isto é, que contenha uma elevada probabilidade de expansão, p , do universo de valores estimados possíveis da mensuranda Y . Esta recomendação é materializada na adoção de uma incerteza de medição expandida, U_p , obtida pela multiplicação da incerteza padrão por um fator de expansão k , determinado pelo nível de confiança pretendido:

$$Y = y \pm U_p = y \pm k \cdot u_c \quad (14)$$

No Quadro 11 são apresentados alguns dos valores adotados para o fator de expansão, k , para o caso de uma distribuição *t-student* tendo em conta diferentes probabilidades de expansão. Esta distribuição de probabilidade é muito semelhante à distribuição normal, contendo um parâmetro adicional: os graus de liberdade, ν . Quanto maior for o número de graus de liberdade mais próxima será a distribuição *t-student* da distribuição normal.

Quadro 11 - Distribuição *t-student* (IOS, 2008)

Graus de liberdade ν	Probabilidade de expansão p					
	(%)					
	68,27	90	95	95,45	99	99,73
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

4.5.4. AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA

Conforme referido no Capítulo 3, a determinação da extensão total na força máxima A_{gt} , pode ser efetuada através de dois métodos distintos: (i) o método automático, através do registo de deformação obtido de um extensómetro instalado no provete previamente ao seu ensaio; (ii) e o método manual, mediante a medição da deformação do provete, por parte do operador, após rotura e finalização do ensaio.

Uma comparação fiável e robusta dos níveis de exatidão obtidos para ambos os métodos de ensaio requer que se proceda à avaliação das incertezas de medição da extensão total na força máxima, tendo em conta o atual enquadramento metrológico em vigor definido pelo GUM (IOS, 2008).

Nas duas secções seguintes é descrita a aplicação da LPI para o caso da grandeza de interesse neste estudo – a extensão total na força máxima – para os métodos de medição automática (secção 4.5.4.1) e manual (secção 4.5.4.2).

4.5.4.1. Incerteza de medição da extensão total na força máxima - método automático

No método automático, a aplicação de extensómetro ao provete de ensaio permite que o valor percentual da extensão total na força máxima, A_{gt} , seja calculado através da expressão:

$$A_{gt} = \frac{L_{def} - L_{base}}{L_{base}} \times 100 \quad (15)$$

onde L_{def} corresponde à deformação medida pelo extensómetro no momento de aplicação de força máxima ao provete enquanto que L_{base} representa o comprimento da base do extensómetro. Na Figura 36 é apresentado o respetivo diagrama funcional onde se identificam as grandezas de entrada, o modelo matemático e a grandeza de saída para este método de ensaio.

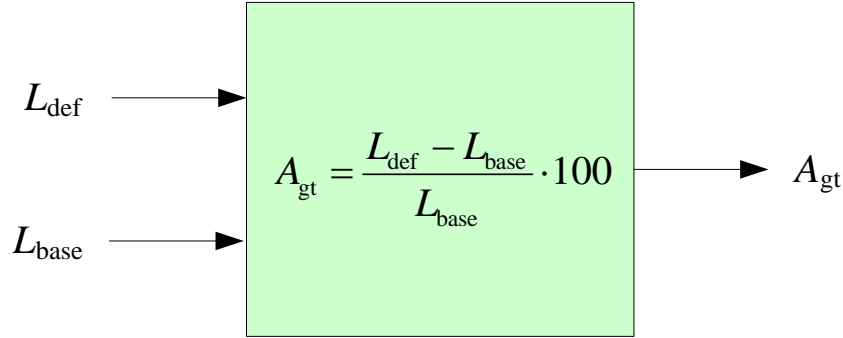


Figura 36 - Diagrama funcional associada à grandeza A_{gt} (método automático)

A aplicação da LPI à grandeza extensão total na força máxima permite obter uma expressão para o cálculo da sua incerteza padrão combinada, isto é:

$$u(A_{gt}) = \sqrt{c_{L_{def}}^2 \cdot u^2(L_{def}) + c_{L_{base}}^2 \cdot u^2(L_{base})} \quad (16)$$

onde os coeficientes de sensibilidade das grandezas deformação medida pelo extensómetro, $c_{L_{def}}$, e comprimento da base do extensómetro, $c_{L_{base}}$, são dados, respetivamente, por:

$$c_{L_{def}} = \frac{\partial A_{gt}}{\partial L_{def}} = \frac{100}{L_{base}} \quad (17)$$

e

$$c_{L_{base}} = \frac{\partial A_{gt}}{\partial L_{base}} = -100 \frac{L_{def}}{L_{base}^2} \quad (18)$$

A introdução destes coeficientes de sensibilidade na expressão (16) permite obter a expressão final para o cálculo da incerteza padrão combinada da grandeza extensão total na força máxima, $u(A_{gt})$, dada por:

$$u(A_{gt}) = \sqrt{\left(\frac{100}{L_{base}}\right)^2 \cdot u^2(L_{def}) + \left(-100 \frac{L_{def}}{L_{base}^2}\right)^2 \cdot u^2(L_{base})} \quad (19)$$

onde $u(L_{def})$ é a incerteza padrão associada à deformação medida pelo extensómetro na força máxima do provete e $u(L_{base})$ corresponde à incerteza padrão do comprimento da base do extensómetro.

4.5.4.2. Incerteza de medição da extensão total na força máxima - método manual

No caso do método manual, o valor da extensão total na força máxima é determinado, no método manual com base no conjunto de modelos matemáticos apresentados na Figura 37 (e mencionados anteriormente no Capítulo 3). Esta Figura constitui o diagrama funcional associado ao método manual onde se identificam as diversas grandezas envolvidas (de entrada e intermédias) na determinação da grandeza de interesse (de saída).

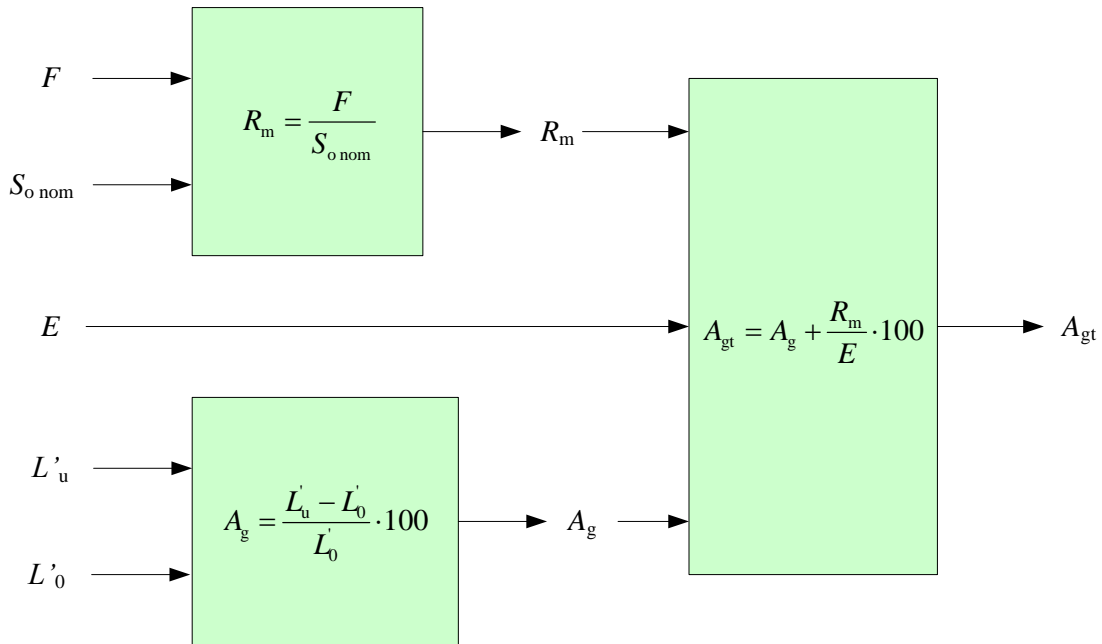


Figura 37 - Diagrama funcional associada à grandeza A_{gt} (método manual)

Neste diagrama observam-se duas grandezas intermédias no processo de medição: a tensão de rotura à tração, R_m , e a extensão permanente na força máxima, A_g . No caso da grandeza tensão de rotura à tração, R_m , a aplicação da LPI conduz à seguinte expressão para o cálculo da sua incerteza padrão combinada:

$$u(R_m) = \sqrt{c_F^2 \cdot u^2(F) + c_{S_{o,nom}}^2 \cdot u^2(S_{o,nom})} \quad (20)$$

onde o coeficiente de sensibilidade associado à grandeza da força medida pela máquina de ensaio, F , é dado por:

$$c_F = \frac{\partial R_m}{\partial F} = \frac{1}{S_{o,nom}} \quad (21)$$

enquanto que o coeficiente de sensibilidade associado à grandeza da área nominal da secção transversal do provete, $S_{o,nom}$, corresponde a:

$$c_{S_{o,nom}} = \frac{\partial R_m}{\partial S_{o,nom}} = -\frac{F}{S_{o,nom}^2} \quad (22)$$

A introdução destes coeficientes de sensibilidade na expressão (20) resulta na obtenção da fórmula final utilizada para o cálculo da incerteza padrão combinada da grandeza tensão de rotura à tração, $u(R_m)$, ou seja:

$$u(R_m) = \sqrt{\left(\frac{1}{S_{o,nom}}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(-\frac{F}{S_{o,nom}^2}\right)^2 \cdot u^2(S_{o,nom})} \quad (23)$$

em que $u(F)$ representa a incerteza padrão da força medida pela máquina de ensaio e $u(S_{o,nom})$ representa a incerteza padrão da área nominal da secção transversal do provete.

Por sua vez, a aplicação da LPI à grandeza de entrada da extensão permanente na força máxima, A_g , permite escrever a sua incerteza padrão combinada como:

$$u(A_g) = \sqrt{c_{L'_u}^2 \cdot u^2(L'_u) + c_{L'_o}^2 \cdot u^2(L'_o)} \quad (24)$$

onde o coeficiente de sensibilidade da grandeza comprimento final entre referências, L'_u , é dado por:

$$c_{L'_u} = \frac{\partial A_g}{\partial L'_u} = \frac{100}{L'_o} \quad (25)$$

e o coeficiente de sensibilidade da grandeza do comprimento inicial entre referências, L'_o , é obtido por:

$$c_{L'_o} = \frac{\partial A_g}{\partial L'_o} = -100 \frac{L'_u}{L'^2_o} \quad (26)$$

A substituição dos coeficientes de sensibilidade na expressão (24) permite definir a fórmula final utilizada para o cálculo da incerteza padrão combinada da grandeza extensão permanente na força máxima, $u(A_g)$, ou seja:

$$u(A_g) = \sqrt{\left(\frac{100}{L'_o}\right)^2 \cdot u^2(L'_u) + \left(-100 \frac{L'_u}{L'^2_o}\right)^2 \cdot u^2(L'_o)} \quad (27)$$

em que $u(L'_u)$ representa a incerteza padrão do comprimento final entre referências e $u(L'_o)$ diz respeito à incerteza padrão do comprimento inicial entre referências.

Por último, a incerteza padrão combinada da grandeza extensão total na força máxima é obtida por:

$$u(A_{gt}) = \sqrt{c_{A_g}^2 \cdot u^2(A_g) + c_{R_m}^2 \cdot u^2(R_m) + c_E^2 \cdot u^2(E)} \quad (28)$$

onde o coeficiente de sensibilidade associado à grandeza da extensão permanente na força máxima, A_g , corresponde a:

$$c_{A_g} = \frac{\partial A_{gt}}{\partial A_g} = 1 \quad (29)$$

enquanto os coeficientes de sensibilidade das grandezas tensão de rotura à tração, R_m , e módulo de elasticidade do material, E , são dados, respetivamente, por:

$$c_{R_m} = \frac{\partial A_{gt}}{\partial R_m} = \frac{100}{E} \quad (30)$$

e

$$c_E = \frac{\partial A_{gt}}{\partial E} = -100 \frac{R_m}{E^2} \quad (31)$$

A introdução das expressões (29) a (31) na expressão (28), permite escrever a incerteza padrão combinada da grandeza extensão total na força máxima, $u(A_{gt})$, como:

$$u(A_{gt}) = \sqrt{u^2(A_g) + \left(\frac{100}{E}\right)^2 \cdot u^2(R_m) + \left(-100 \frac{R_m}{E^2}\right)^2 \cdot u^2(E)} \quad (32)$$

em que $u(A_g)$ representa a incerteza padrão combinada da extensão permanente na força máxima (definida pela expressão 27), $u(R_m)$ diz respeito à incerteza padrão combinada da tensão de rotura à tração (obtida da expressão 23) e $u(E)$ corresponde à incerteza padrão do módulo de elasticidade do material.

5

Campanha Experimental

5.1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo descreve-se a campanha experimental definida para determinar a influência da medição da extensão total na força máxima através dos dois métodos: (i) o método automático (ii) e o método manual, no ensaio de tração dos varões de aço para betão armado.

Abordam-se também todos os procedimentos implementados e equipamentos utilizados tendo em vista a apresentação, o mais clara possível, do trabalho experimental desenvolvido. Considera-se que a exposição dos procedimentos experimentais é indispensável para a compreensão das medições efetuadas e para a análise e interpretação dos resultados obtidos.

Finalmente, apresentam-se também os cálculos necessários à obtenção da extensão total na força máxima através do método manual e um registo das observações efetuadas no decorrer dos ensaios que facilita a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de tração.

5.2. DEFINIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental desenvolvida neste trabalho consistiu na realização de 310 ensaios de tração em provetes de aço para betão armado. Os ensaios foram realizados na Unidade de Produtos Metálicos (UPM), do Laboratório de Ensaios e Metrologia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC-EM), suportado, pelo Núcleo de Comportamento de Estruturas (NCE) do Departamento de Estruturas (DE).

O estudo para analisar a influência do método de ensaio para a determinação da extensão total na força máxima, A_{gt} , envolveu cinco tipos diferentes de varões de aço para betão armado: A500ER, A400NR, A500NR, A400NR SD e A500NR SD.

Para a classe de resistência A500ER, foram realizados 20 ensaios de tração em varões de aço com o diâmetro de 6 mm. Para a classe de resistência A400NR, realizaram-se 40 ensaios de tração em varões de aço com os diâmetros de 12 mm e 16 mm. Para a classe de resistência A500NR, foram realizados 40 ensaios de tração em varões de aço com os diâmetros de 8 mm, 12 mm e 25 mm. No caso da classe de resistência A400NR SD, realizaram-se 100 ensaios de tração em varões de aço com os diâmetros de 10 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm e 25 mm. Por fim, na classe de resistência A500NR SD, realizaram-se 110 ensaios de tração em varões de aço com diâmetros de 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm,

25 mm e 32 mm. No Quadro 12 sistematizam-se as diferentes condições de realização do ensaio bem como o número de ensaios realizados por diâmetro e por tipo de aço.

Quadro 12 - Resumo dos ensaios de tração realizados por diâmetro e por tipo de aço

Condições do ensaio	Tipos de aço	Número de ensaios	Diâmetros (mm)									Total de ensaios
			6	8	10	12	14	16	20	25	32	
Instalação dos extensómetros no centro do provete	A500 ER	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	240
	A400 NR	30	-	-	-	10	-	20	-	-	-	
	A500 NR	30	-	20	-	-	-	-	-	10	-	
	A400 NR SD	70	-	-	20	10	-	10	20	10	-	
	A500 NR SD	90	-	20	30	10	10	-	-	20	-	
Instalação dos extensómetros nas zonas superior e inferior do provete	A400 NR	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	40
	A500 NR	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	
	A400 NR SD	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	
	A500 NR SD	10	-	-	-	-	-	-	-	-	10	
Medição da deformação do provete na força máxima de ensaio	A400 NR SD	20	-	-	-	-	-	10	10	-	-	30
	A500 NR SD	10	-	10	-	-	-	-	-	-	-	
Total global												310

Os provetes utilizados na realização deste estudo são provenientes das ações de acompanhamento da certificação da produção de varões de aço para armaduras de betão armado. O material ensaiado pertence a 9 fabricantes diferentes cujos países de origem se apresentam no Quadro 13.

Os provetes foram ensaiados sob condições ambientais controladas: $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e possuíam um comprimento de $800\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$.

Salienta-se também que a necessidade de realização desta campanha experimental está intimamente associada à aquisição, pelo Núcleo de Comportamento de Estruturas (NCE) do LNEC-EM, de um extensómetro automático (INSTRON M300B) para determinação da extensão total na força máxima (método automático).

Quadro 13 - Origem e identificação das amostras ensaiadas

Países	Número de fábricas	Número de provetes	Tipos de aço	Diâmetros (mm)
Alemanha	1	20	A500 NR SD	14 e 25
Espanha	4	170	A500 ER, A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD	6, 8, 10, 12, 16, 20 e 25
Portugal	3	110	A500 ER, A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD	6, 10, 12, 16, 20, 25 e 32
Turquia	1	10	A500 NR	12

Assim, em todos os ensaios realizados no âmbito deste estudo procedeu-se à aplicação dos dois métodos previstos nas normas aplicáveis (automático e manual) para a determinação da extensão total na força máxima, A_{gt} .

Com o intuito de tornar simples e objetiva a identificação dos resultados obtidos através dos diferentes métodos e equipamentos, criou-se uma codificação cuja nomenclatura consta no Quadro 14.

Quadro 14 - Nomenclatura adotada para as diversas medições de A_{gt} efetuadas no âmbito deste estudo

Método	A_{gt}	Nomenclatura
Automático	Extensómetro INSTRON M300B	A_{gt} M300
	Extensómetro EPSILON 3543	A_{gt} EQ 50
Manual	Extensão após rotura	A_{gt} Manual
	Extensão na força máxima de ensaio	A_{gt} $F_{máx}$

5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Na presente secção são descritas as características mais relevantes dos equipamentos utilizados no presente estudo.

5.3.1. ESTUFA

Como referido na (Especificação E 456, 2011), para a classe de resistência A500ER, o ensaio de tração é realizado após envelhecimento artificial do provete. Para envelhecer o provete, este é aquecido a 100 °C durante 1 hora e posteriormente arrefecido ao ar até à temperatura ambiente (23 °C ± 5 °C).

Trata-se de uma estufa da marca SOLO com o modelo 102-STF/120/D, do ano 1993, com alcance até 290 °C e com a resolução de 1 °C (Figura 38).

Este equipamento, face ao último ensaio realizado pela Unidade de Metrologia Aplicada (UMA) do LNEC-EM com o Boletim de Ensaio n.º 0314/2014-UMA (Anexo A), tem uma variação espacial da temperatura de 1,75 °C para o patamar de 100 °C de acordo com o Procedimento de Ensaio Metrológico (E0215 v.01, 2008) e o valor máximo da incerteza expandida associada à medição de temperaturas é de 0,09 °C (Ponte de medição de temperatura e PRT's100).



Figura 38 - Estufa

5.3.2. BALANÇA

Para a determinação dos desvios da massa dos provetes conforme previsto na norma (ISO 6892-1, 2009) recorre-se à utilização de uma balança (Figura 39). Os desvios da massa são obtidos a partir da diferença entre a massa real por unidade de comprimento do varão e o respetivo valor nominal. A massa real por unidade de comprimento de um varão determina-se por pesagem e medição de um provete de comprimento não inferior a 500 mm.

Trata-se de uma balança da marca METTLER com o modelo PB 8100, do ano 1996, com alcance até 8100 g e com a resolução de 0,1 g.

Este equipamento, em relação à última calibração realizada pela UMA do LNEC-EM com o Certificado de Calibração n.º 0541/2014-UMA (Anexo A), tem um desvio máximo de 0,1 g no patamar de 8000 g de acordo com o Procedimento de Calibração (MA/MEC.PRC.0104.00, 2014) e o valor máximo da incerteza expandida em cada patamar de medição é de 0,07 g.

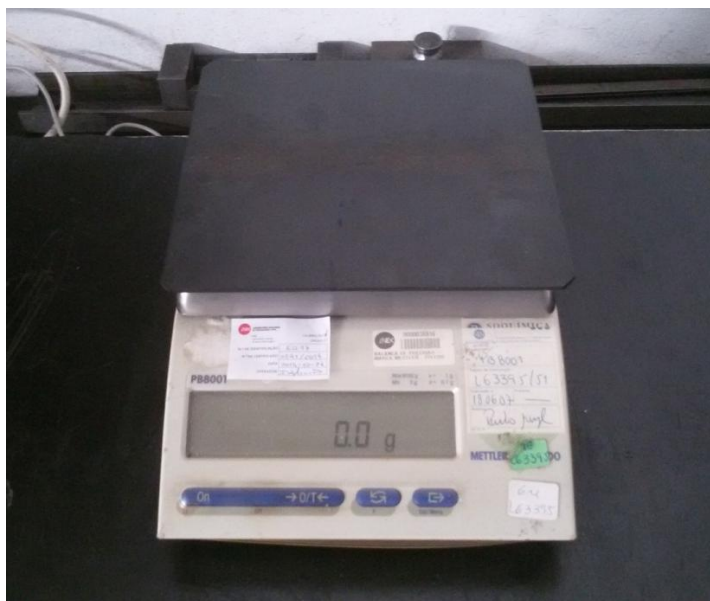


Figura 39 - Balança

5.3.3. MÁQUINA DE MARCAÇÃO EQUIDISTANTE AO LONGO DA ZONA ÚTIL DO PROVETE

A máquina de marcação representada na Figura 40 foi utilizada para a realização de marcações equidistantes que são necessárias efetuar ao longo da zona útil do provete. Trata-se de um equipamento da marca WALTER com o modelo TA 800, do ano 1997.

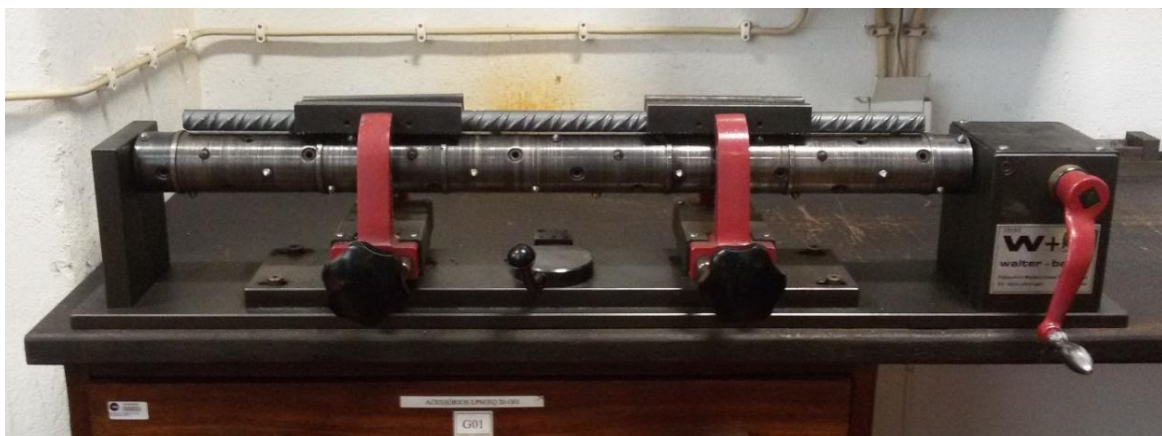


Figura 40 - Equipamento de marcação equidistante ao longo da zona útil dos provetes

As marcações realizadas por este equipamento devem ser feitas de forma a que a distância entre duas marcas consecutivas seja igual a um submúltiplo do comprimento inicial entre referências, conforme referido no Capítulo 3.

5.3.4. MÁQUINA DE ENSAIOS DE FORÇA

Para a realização dos ensaios de tração propriamente ditos foi utilizada uma máquina de garras hidráulicas que permite a realização de ensaios mecânicos em regime de tração e compressão. O curso do êmbolo é de 300 mm e tem uma distância máxima entre garras de 1200 mm.

Este equipamento (Figura 41) do fabricante INSTRON, modelo 600LX-B1-C4-J3D, foi adquirido em 2008 e possui uma capacidade de carga até 600 kN com uma resolução mínima de leitura de 0,01 kN.

Relativamente à última calibração realizada pela UMA do LNEC-EM com o Certificado de Calibração n.º 0158/2015-UMA (Anexo A), este equipamento foi calibrado em duas escalas de força: de 6 kN até 60 kN e de 60 kN até 600 kN, tendo sido classificado na classe 0,5. Esta classe é a melhor classificação que é possível atribuir a uma máquina de ensaios mecânicos de acordo com a norma (NP EN ISO 7500-1, 2006), e o valor máximo da incerteza expandida em cada patamar de medição é de 0,29% da força medida para a escala de forças de 6 kN a 60 kN e de 0,43% da força medida para a escala de forças de 60 kN a 600 kN.



Figura 41 - Máquina de ensaios mecânicos

5.3.5. EXTENSÓMETROS

Tendo em conta os objetivos deste estudo, os equipamentos mais importantes são os dois extensómetros que foram instalados, em simultâneo, no início do ensaio de cada um dos provetes.

Estes equipamentos permitem efetuar o registo contínuo da deformação do provete (em %) ao longo do desenvolvimento do ensaio de tração.

5.3.5.1. Extensómetro INSTRON

Este extensómetro é um equipamento da marca INSTRON, modelo M300B, do ano 2009, com alcance até 300 mm e com uma resolução de 0,01 mm.

Este extensómetro encontra-se acoplado à máquina de ensaios mecânicos de força INSTRON 600LX, conforme representado na Figura 42.

Em face da última calibração realizada pela UMA do LNEC-EM com o Certificado de Calibração n.º 0642/2014-UMA (Anexo A), este equipamento apresenta um desvio máximo de 0,025 mm de acordo com o Procedimento de Calibração (MA/MEC.PRC.3301.00, 2013) e o valor máximo da incerteza expandida em cada patamar de medição é de 0,008 mm.



Figura 42 - Extensómetro INSTRON

5.3.5.2. Extensómetro EPSILON

Este segundo extensómetro é da marca EPSILON, modelo 3543, do ano 2009, com alcance até 50 mm possuindo também uma resolução de 0,01 mm (Figura 43).

De acordo com a última calibração realizada pela UMA do LNEC-EM com o Certificado de Calibração n.º 0643/2014-UMA (Anexo A), este equipamento está classificado na classe 0,2 de acordo com o Procedimento de Calibração (MA/MEC.PRC.3501.00, 2013) e o valor máximo da incerteza expandida em cada patamar de medição é de 16 μm .

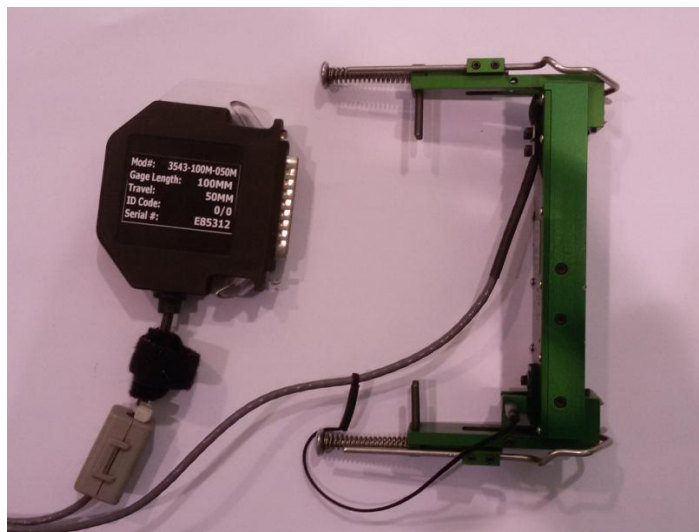


Figura 43 - Extensómetro EPSILON

5.3.6. PAQUÍMETRO DIGITAL

Para além dos extensómetros, foi necessário recorrer à utilização de um paquímetro digital (Figura 44) para efetuar a medição do comprimento final, entre as marcas de referência, em parte do provete fraturado num ensaio de tração, tendo em vista a determinação da extensão total na força máxima pelo método manual.

O paquímetro digital utilizado é da marca MITUTOYO, modelo CD-15DC, do ano 1998 e possui um alcance até 150 mm, com a resolução de 0,01 mm.

Este equipamento encontra-se calibrado pela UMA do LNEC-EM com o Certificado de Calibração n.º 0134/2015-UMA (Anexo A). Tem um desvio máximo de 0,01 mm de acordo com o Procedimento de Calibração (MA/MEC.PRC.0901.00, 2014) e o valor máximo da incerteza expandida em cada patamar de medição é de 0,019 mm.



Figura 44 - Paquímetro digital

Para além de todos os equipamentos anteriormente descritos, recorreu-se ainda à utilização de uma fita métrica (Figura 45) comum com alcance até 3 m para efetuar a medição do

comprimento dos provetes a ensaiar. A este componente não foi realizada qualquer calibração.



Figura 45 - Fita métrica

5.4. SOFTWARE & SISTEMA DE REGISTO E TRATAMENTO DE DADOS

5.4.1. SOFTWARE

Para determinar os resultados obtidos nos ensaios de tração realizados na máquina de ensaios mecânicos de força (INSTRON 600LX), recorreu-se à utilização do *software* PARTNER (INSTRON, 2008) fornecido pela empresa INSTRON especificamente para este equipamento de ensaio. Este *software* tem a particularidade de permitir a configuração específica dos parâmetros que se pretendem determinar.

Para o desenvolvimento da campanha experimental prevista neste estudo foram elaborados cinco procedimentos de ensaio no *software* PARTNER (INSTRON, 2008) distintos, para os cinco tipos diferentes de varões de aço para betão armado, uma vez que cada produto apresenta características diferentes, conforme anteriormente descrito no Capítulo 2 e nas Especificações LNEC.

Para a classe de resistência A500ER, foi criado um procedimento com a referência *A500ER_EQ50_M300_RM*. Na classe de resistência A400NR, elaborou-se o procedimento com a referência *A400NR_EQ50_M300_RM*. Em relação à classe de resistência A500NR, foi criado o procedimento com a referência *A500NR_EQ50_M300_RM*. Na classe de resistência A400NR SD, elaborou-se o procedimento com a referência *A400NRSD_EQ50_M300_RM* e por último para a classe de resistência A500NR SD, foi criado o procedimento com a referência *A500NRSD_EQ50_M300_RM*.

Nestes procedimentos foram definidos os métodos de cálculo para as grandezas bem como os parâmetros que se pretendem determinar na realização do ensaio de tração em varões de aço para betão armado, garantindo o cumprimento dos requisitos normativos aplicáveis.

A título exemplificativo seguidamente descreve-se de forma sucinta a elaboração do procedimento *A400NR_EQ50_M300_RM* no *software* PARTNER (INSTRON, 2008) para as armaduras da classe de resistência A400NR.

Numa primeira fase foi definido o tipo de provete a ensaiar (cilíndrico) e bem como a respetiva identificação (cliente, vazamento, referência do provete e o operador de ensaio).

De seguida, foi necessário proceder à instalação e respetiva configuração dos dois extensómetros (INSTRON e EPSILON) (Figura 46), para que os mesmos efetuassem, em simultâneo, o registo da deformação medida no provete ao longo do ensaio, com o objetivo de determinar a extensão total na força máxima, A_{gt} (método automático).

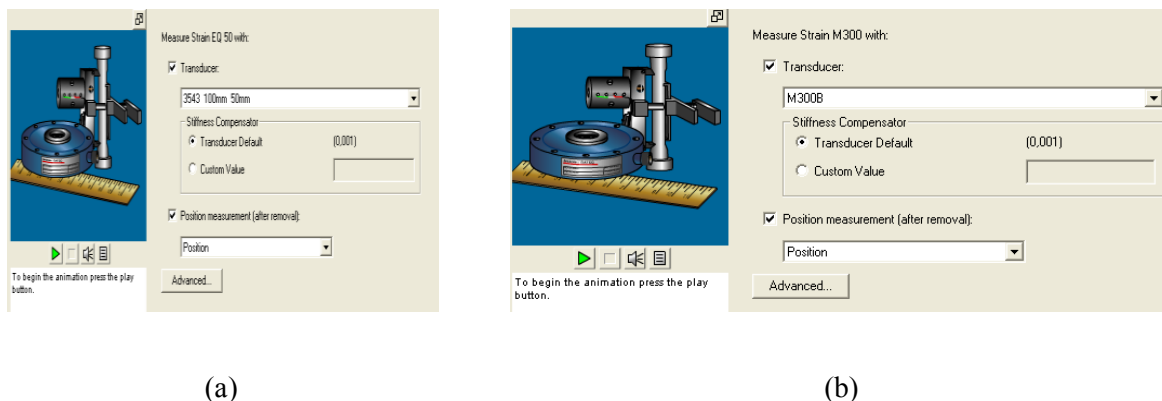


Figura 46 - Extensómetros: (a) EPSILON 3543; (b) INSTRON M300B

Posteriormente procedeu-se à configuração dos parâmetros a determinar no decorrer do ensaio de tração (Figura 47), nomeadamente: a extensão total na força máxima (obtida através de dois extensómetros), a força de cedência, a tensão de cedência inferior, a força de rotura à tração, a tensão de cedência, a tensão de rotura à tração, a tensão de cedência superior e o módulo de elasticidade.

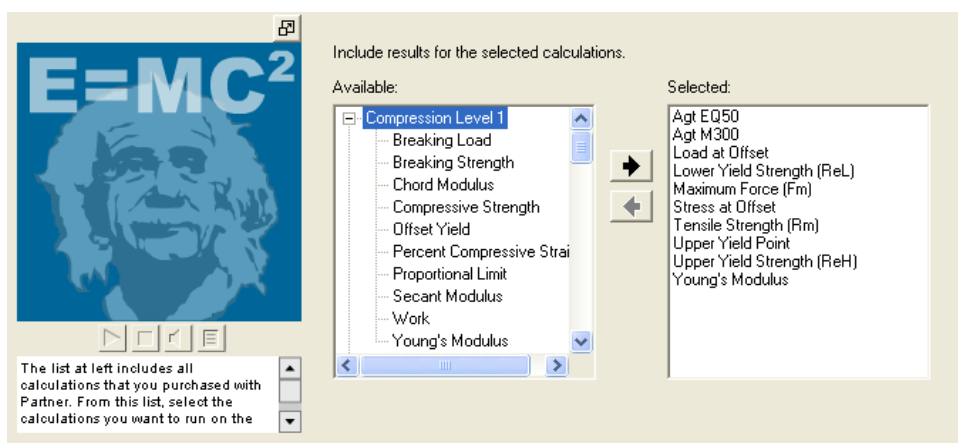


Figura 47 - Configuração dos parâmetros a determinar no ensaio de tração

Relativamente à determinação da tensão de cedência, uma vez que o patamar de cedência pode ser variável, ou seja, dado que em alguns varões de aço não apresentam qualquer patamar de cedência (tipicamente nos varões endurecidos a frio da classe A500ER) e a transição entre as fases de comportamento elástico e plástico ocorre de forma progressiva, procedeu-se à configuração da determinação da tensão de cedência superior e inferior no caso de ocorrer patamar de cedência e a determinação da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% no caso de ocorrer a inexistência do patamar de cedência (Figura 48).

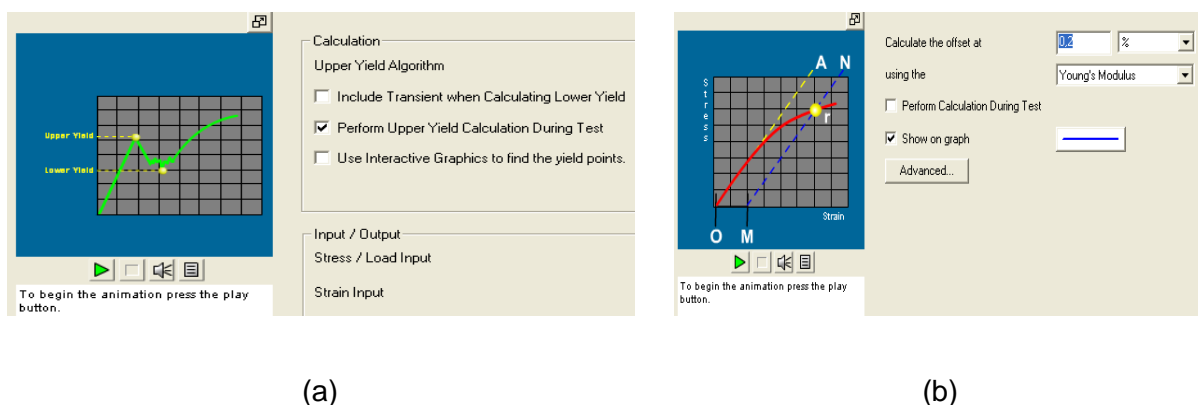


Figura 48 - (a) Tensão de cedência superior e inferior; (b) Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%

Embora os extensómetros utilizados no ensaio de tração estejam preparados para permanecer instalados no provete até à conclusão do ensaio (rotura à tração), para garantir que não ocorrem danos consideráveis nestes equipamentos, dada a relevância do seu desempenho para a atividade laboratorial, procedeu-se também a uma configuração específica dos mesmos, nesse sentido. Ou seja, depois da extensão total na força máxima ser determinada e após ocorrer uma diminuição da força de 2% em relação à força máxima do ensaio de tração (Figura 49 e Figura 50), o ensaio fica suspenso ou seja, a força é mantida constante, para que seja possível proceder, em segurança, à remoção dos extensómetros. Após a remoção dos extensómetros é dada continuidade ao ensaio e o equipamento prossegue com a aplicação da força de forma contínua até ser atingida a rotura do provete.

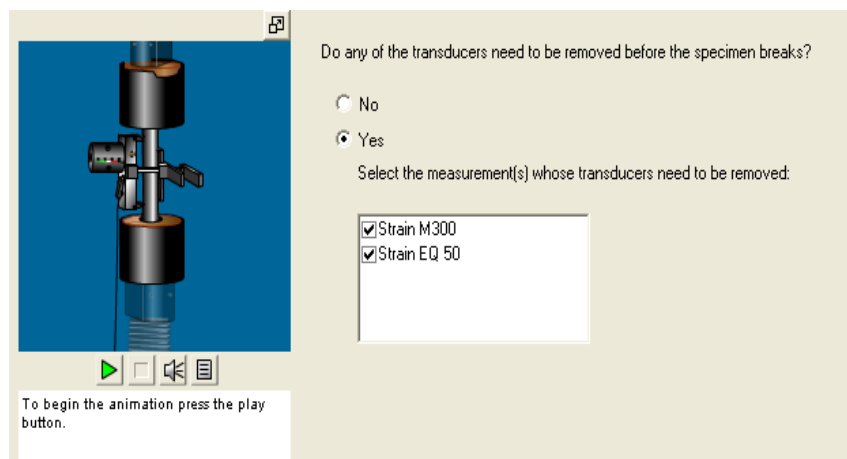


Figura 49 - Extensómetros a remover antes da rotura do provete

Para esta última fase do ensaio, foram também definidos dois patamares de velocidade de ensaio, de acordo com os limites especificados na norma (ISO 6892-1, 2009). O primeiro patamar refere-se ao domínio elástico, até se atingir a tensão de cedência ou a tensão limite convencional de proporcionalidade, e a velocidade de aplicação da força é de 15 MPa.s^{-1} . Após a determinação da tensão de cedência ou a tensão limite convencional de

proporcionalidade, existe um segundo patamar de velocidade em que a aplicação da força é aumentada até uma velocidade de deformação de 60 MPa.s^{-1} .

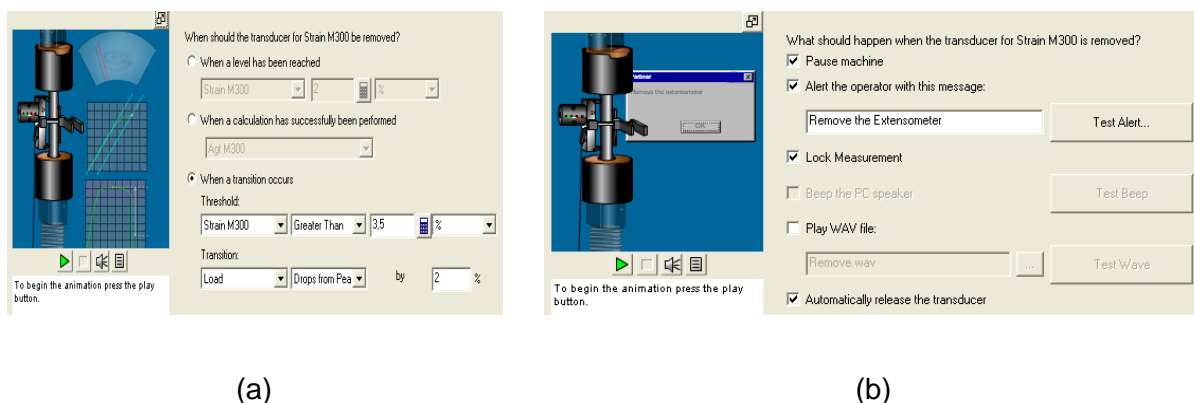


Figura 50 - (a) Limites para a remoção dos extensómetros; (b) Definição de parâmetros na remoção dos extensómetros

5.4.2. SISTEMA DE REGISTO E TRATAMENTO DE DADOS

Nesta secção descreve-se numa primeira fase o procedimento de registo dos dados obtidos através do *software* PARTNER (INSTRON, 2008) e posteriormente o tratamento de dados necessário à obtenção dos resultados indispensáveis à concretização dos objetivos definidos para o presente estudo.

Assim, inicialmente procedeu-se à elaboração de uma folha de cálculo para cada um dos cinco tipos de varões de aço ensaiados (A500ER, A400NR, A500NR, A400NR SD e A500NR SD), para que fosse possível efetuar o registo dos valores provenientes do *software* para as seguintes grandezas: força de cedência, F_{eH} ou a força limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $F_{p0,2}$, força máxima, F_m , e na determinação da extensão total na força máxima, A_{gt} M300 e A_{gt} EQ 50 (método automático).

Nestas folhas de cálculo elaboradas para o registo de dados foram desenvolvidos também cálculos complementares tendo em vista a determinação de outros parâmetros que caracterizam os varões de aço ensaiados (Anexo D): (i) diâmetro efetivo, d ; (ii) área efetiva da secção inicial da zona útil, S_0 ; (iii) tensão de cedência superior, R_{eH} ou a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $R_{p0,2}$, calculadas em função da área nominal; (iv) tensão de rotura à tração, R_m , calculada em função da área nominal; (v) e o comprimento final entre referências, L'_u , para determinação do A_g e do A_{gt} (método manual).

A metodologia de determinação destas grandezas foi anteriormente descrita na secção 3.4 do Capítulo 3 relativa às propriedades obtidas a partir do ensaio de tração.

De forma a garantir que os resultados obtidos permitem uma análise fiável e robusta, todos os resultados obtidos, nos ensaios de tração realizados neste estudo experimental, foram validados através das folhas de cálculo disponíveis na Base dos Boletins de Ensaios para varões de aço que se encontra em vigor na UPM, com a referência UPM/AR.BE.23.00.

5.5. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Com vista a assegurar a determinação da extensão total na força máxima dos provetes metálicos a ensaiar, das diferentes formas necessárias à concretização dos objetivos do estudo, foi elaborado um procedimento de ensaio (Anexo B) que descreve os princípios, os métodos e os procedimentos necessários à realização dos ensaios de tração em causa, e consequentemente assegurar a sua adequação à utilização pretendida.

Este documento, para além de descrever o procedimento a adotar na realização dos ensaios de tração de acordo com o especificado na norma (ISO 6892-1, 2009) e na (ISO 15630-1, 2010) (conforme descrito no Capítulo 3), define também os dois métodos a adotar em relação ao posicionamento dos extensómetros a instalar no provete de aço ao longo do ensaio e a forma de determinação da extensão total na força máxima obtida através da medição da deformação do provete após rotura (método manual).

Tendo em vista os objetivos do estudo e o esclarecimento das diferentes existentes entre a medição automática e manual, numa primeira fase foram realizados ensaios de tração recorrendo à utilização simultânea de dois extensómetros na zona central do provete. Assim, os dois extensómetros foram instalados de acordo com o representado na Figura 51.

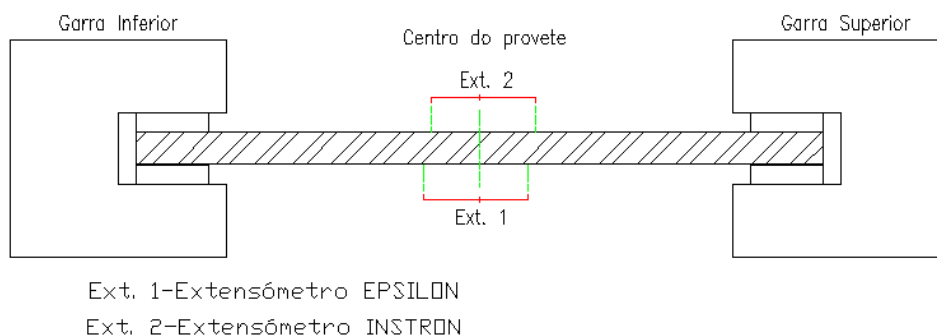


Figura 51 - Representação esquemática da instalação dos extensómetros no centro do provete

Após ter sido garantida a existência de resultados similares entre os dois extensómetros, avançou-se para a instalação destes dois equipamentos em zonas distintas do provete, tendo em vista avaliar se os resultados obtidos estavam ou não associados à heterogeneidade do material ensaiado ao longo do comprimento útil (Figura 52).

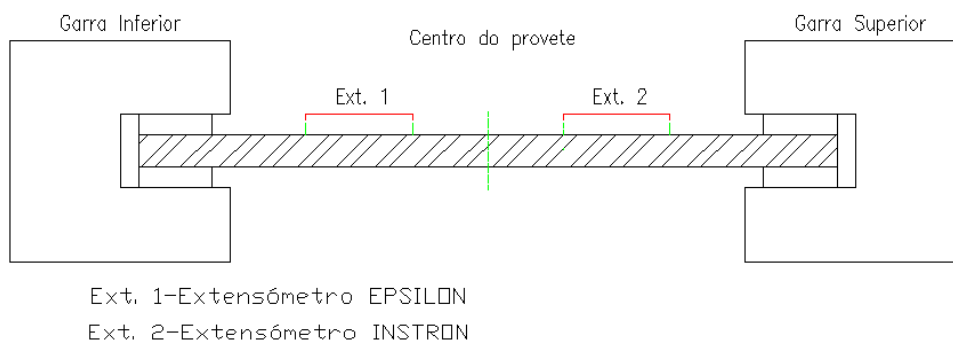


Figura 52 - Representação esquemática da instalação dos extensómetros na parte superior e inferior do provete

Relativamente à medição manual, para se poder determinar a extensão total na força máxima com a maior exatidão possível, através da medição da deformação do provete após rotura, preconizou-se que as medições fossem efetuadas, sempre que possível, em quatro zonas distintas ao longo do provete ensaiado, conforme se ilustra na Figura 53.

Consideram-se então duas zonas junto a cada uma das garras da máquina de ensaio (L1G e L2G) e outras duas zonas junto à zona de rotura (L1R e L2R). Em qualquer caso, foram assegurados os afastamentos à zona de amarração e à zona de rotura especificados na norma de ensaio (Figura 53).

A realização destas medições tem como principal objetivo a obtenção de resultados para apoiar a análise do comportamento dos provetes ao nível da deformação em regime elastoplástico.

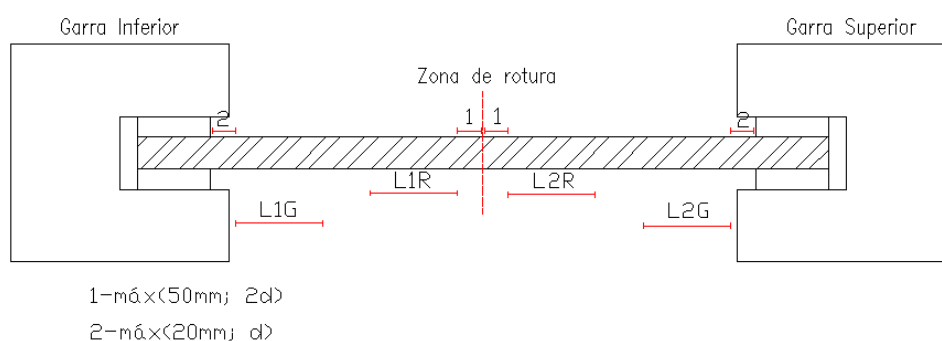


Figura 53 - Representação esquemática das zonas para medição do comprimento entre referências (método manual)

5.6. DETERMINAÇÕES PARA A AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO

Com o objetivo de avaliar a influência da metodologia de ensaio nos resultados da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado, efetuaram-se as seguintes determinações:

- Determinação da extensão total na força máxima através da instalação dos extensómetros no centro do provete;
- Determinação da extensão total na força máxima através da instalação dos extensómetros nas zonas superior e inferior do provete;
- Determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete após rotura em quatro zonas distintas, ao longo do provete;
- Determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete na força máxima de ensaio.

Neste estudo experimental, todos os ensaios de tração bem como todas as medições efetuadas ao comprimento final entre referências após a rotura dos provetes (L'_u), para a determinação da extensão total na força máxima através do método manual, foram realizados por um Técnico qualificado da UPM, do LNEC-EM.

Nas secções seguintes descreve-se detalhadamente a metodologia adotada para cada uma das formas de determinação da extensão total na força máxima anteriormente definidas.

5.6.1. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA INSTALAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS NO CENTRO DO PROVETE

A caracterização mecânica dos varões de aço é obtida a partir da realização do ensaio de tração à rotura de acordo com a norma (ISO 6892-1, 2009) e a (ISO 15630-1, 2010), dando-se neste caso particular relevância à metodologia de obtenção da extensão total na força máxima dos diferentes tipos de varões de aço para betão armado.

Conforme anteriormente referido, o quadro normativo em vigor permite determinar a extensão total na força máxima à tração através de dois métodos: (i) automático (ii) e manual.

Em ambos os casos, o provete é colocado na máquina de ensaios mecânicos de força (INSTRON 600LX) e fixado axialmente, através do sistema de amarração de garras hidráulicas, de modo a não causar danos à superfície do provete. Posteriormente são instalados os dois extensómetros (INSTRON e EPSILON) em paralelo no centro do provete (ver Figura 51) por forma a garantir que o registo da deformação medida ao longo do ensaio é precisamente na mesma zona do provete, conforme representado na Figura 54. De seguida dá-se início ao ensaio aplicando a força de tração à velocidade prevista na norma até se atingir a rotura do provete.



Figura 54 - Extensómetros instalados no centro do provete

Após a conclusão do ensaio de tração, o provete é removido da máquina de ensaios de força e é assente sobre um acessório de madeira para se efetuar a medição, na parte mais longa do provete fraturado, da extensão permanente na força máxima A_g (Figura 55), a partir da qual é depois calculada a extensão total na força máxima A_{gt} (método manual).



Figura 55 - Medição da extensão permanente na força máxima

A determinação, em paralelo, da extensão total na força máxima tem como objetivo principal efetuar uma análise comparativa entre os valores da extensão total na força máxima obtidos através dos dois métodos: (i) método automático (ii) e o método manual, em varões de aço de diferentes tipos, com vários diâmetros e produzidos por diversos fabricantes. Ambos os resultados obtidos permitem, no atual quadro normativo, caracterizar a deformação dos provetes em regime elastoplástico.

5.6.2. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA INSTALAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS NA ZONA SUPERIOR E INFERIOR DO PROVETE

Neste caso pretende-se, de igual modo, efetuar uma análise comparativa entre os valores da extensão total na força máxima obtidos através dos dois métodos previsto na norma de referência (manual e automático). No entanto aqui recorre-se à instalação dos dois extensómetros em zonas distintas do provete (ver Figura 52): (i) superior (ii) e inferior, para se analisar o registo da deformação medida ao longo do ensaio em diferentes zonas do provete, conforme se ilustra na Figura 56.



Figura 56 - Extensómetros instalados em zonas distintas do provete

O processo de fixação do provete e de realização do ensaio é feito exatamente da forma descrita na secção anterior. Mantém-se também inalterada a forma de determinação da extensão total na força máxima com base no registo dos extensómetros (método automático). A determinação da extensão total na força máxima, pelo método manual, continua a ser feita a partir da determinação da extensão permanente na força máxima A_g .

5.6.3. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE APÓS ROTURA EM QUATRO ZONAS DISTINTAS AO LONGO DO PROVETE

Com a medição da deformação do provete após rotura em quatro zonas distintas ao longo do provete pretende-se estudar, de modo aprofundado, a deformação ao longo da zona útil do provete, que ocorre quando este é submetido a ensaio de tração à rotura. Neste caso, obtém-se quatro resultados diferentes para a extensão total na força máxima determinada através do método manual, que estão altamente associados à zona onde ocorre a rotura do provete.

Para tal, optou-se por fazer a medição da extensão permanente na força máxima A_g , a partir da qual é determinada a extensão total na força máxima A_{gt} , inicialmente em duas zonas junto à zona de rotura do provete: (i) rotura inferior L1R (ii) e a rotura superior L2R. Posteriormente e sempre que possível, são efetuadas outras medições nas zonas junto a cada uma das garras hidráulicas da máquina de ensaios mecânicos de força: (i) garra inferior L1G (ii) e a garra superior L2G (ver Figura 53).

Para efetuar a medição da extensão permanente na força máxima no provete, este é colocado sobre um acessório de madeira e procede-se à medição do comprimento final entre referências nas zonas sujeitas a medição através das marcações equidistantes ao longo da zona útil do provete conforme representado na Figura 57.

Em todas as medições efetuadas neste estudo foram tidos em consideração os afastamentos à zona de amarração e à zona de rotura que se encontram preconizados na norma de ensaio, a saber: 20 mm ou d à zona de amarração e 50 mm ou $2d$ à zona de rotura.



Figura 57 - Representação das diferentes zonas de um provete, sujeitas a medição da extensão permanente na força máxima, A_g

5.6.4. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE NA FORÇA MÁXIMA DE ENSAIO

Finalmente, para se esclarecer a origem das diferenças que vinham sendo encontradas nos resultados obtidos através dos dois métodos (automático e manual) optou-se por determinar, pelos dois métodos, a extensão total na força máxima de forma simultânea. Isto é, no decorrer do ensaio, quando o provete se encontra na fase de comportamento plástico e consequentemente com a deformação máxima admissível, é então determinado o valor da extensão total na força máxima através dos extensómetros (INSTRON e EPSILON) que encontram-se instalados no centro do provete de forma paralela, e em simultâneo, é também efetuada a medição do valor da extensão permanente na força máxima, para posteriormente ser calculada a extensão total na força máxima do provete após submetido a tração.

A medição da extensão permanente na força máxima é efetuada, precisamente, na mesma zona onde os extensómetros se encontram instalados no provete, conforme ilustrado na Figura 58. Esta medição é efetuada posteriormente a uma diminuição da força inferior a 0,5% em relação à força máxima do ensaio de tração, em que a máquina de ensaios mecânicos se encontra em modo suspenso e determina-se, por recurso ao paquímetro, o valor da extensão permanente na força máxima A_g .



Figura 58 - Medição da extensão permanente na força máxima de ensaio

Após a conclusão da medição da extensão permanente na força máxima, o ensaio de tração prossegue normalmente até ser obtida a rotura do provete.

Para melhor se esclarecer a origem dos resultados da extensão total na força máxima obtidos pelos extensómetros e com base na medição efetuada com o paquímetro, recorreu-se à utilização de provetes adjacentes aos utilizados para a realização dos ensaios descritos na seção 5.6.1. Ou seja, estes resultados referem-se a varões do mesmo fabricante, do mesmo tipo, do mesmo diâmetro e do mesmo vazamento.

6

Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos

6.1. INTRODUÇÃO

No presente Capítulo procura-se avaliar de uma forma abrangente e exaustiva a influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima, A_{gt} . Para tal, apresentam-se e analisam-se, nas secções 6.2.1 a 6.2.4, os resultados obtidos para as diferentes determinações da extensão total da força máximas definidas no programa experimental anteriormente exposto.

Na secção 6.3 apresenta-se uma sistematização dos resultados determinados pelas diferentes metodologias.

Finalmente, na secção 6.4 avaliam-se e comentam-se os resultados obtidos para a incerteza associada à medição da extensão total na força máxima por ambos os métodos aplicados neste trabalho (manual e automático).

6.2. RESULTADOS OBTIDOS

Como é sabido, a resistência à tração é uma das características mais importantes das armaduras, pois nas estruturas a função deste material é essencialmente resistir às tensões de tração enquanto o betão tem a função de resistir aos esforços de compressão.

Com a evolução dos regulamentos de estruturas de betão armado a extensão total na força máxima representa um dos parâmetros mais importantes e de estudo fundamental no sentido de explorar o seu regime elastoplástico, isto é, a capacidade do material dissipar energia de uma forma estável e controlada.

A determinação da extensão total na força máxima dos varões quando submetidos a ensaio de tração pode, conforme anteriormente exposto, ser efetuada de diferentes maneiras.

Assim, nas secções seguintes são apresentados e analisados os resultados obtidos nas diferentes determinações da extensão total na força máxima realizadas ao longo dos ensaios efetuados.

Para uma análise pormenorizada dos valores obtidos neste estudo, os resultados obtidos são enquadrados nas gamas em que os diferentes diâmetros dos varões de aço se inserem: (i) baixa; (ii) média (iii) e alta.

Na gama baixa incluem-se os varões de aço com diâmetros de 6 mm a 10 mm, a gama média é representada por varões de aço com diâmetros de 12 mm a 20 mm e, por fim, na gama alta inserem-se os varões de aço de 25 mm a 40 mm de diâmetro.

6.2.1. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA INSTALAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS NO CENTRO DO PROVETE

Os resultados relativos à extensão total na força máxima obtidos através da instalação dos extensómetros no centro do provete e através da medição manual, para as gamas baixa, média e alta são apresentados no Quadro 15, no Quadro 16 e no Quadro 17, respetivamente.

Quadro 15 - Extensómetros na zona central: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama baixa

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)
A500 NR	8	9,3	9,2	9,2
A400 NR SD	10	15,5	14,2	15,0
A500 NR SD	8	11,0	10,3	10,4
	10	11,2	10,3	10,3
A500 ER	6	4,5	4,1	4,0

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

Quadro 16 - Extensómetros na zona central: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama média

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)
A400 NR	12	17,5	15,9	15,9
	16	16,3	13,2	13,1
A400 NR SD	12	17,4	14,6	15,9
	16	15,4	13,3	13,3
	20	14,3	13,3	13,8
A500 NR SD	12	9,7	8,5	8,9
	14	10,6	9,6	9,9

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

Quadro 17 - Extensómetros na zona central: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama alta

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A_{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A_{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)
A500 NR	25	9,2	8,9	9,0
A400 NR SD	25	15,7	13,7	14,1
A500 NR SD	25	11,7	9,7	9,7

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

Antes de mais, os resultados obtidos com a instalação dos extensómetros no centro do provete permitem constatar que os valores da extensão total na força máxima determinados pelo método manual são, de uma forma sistemática, significativamente superiores aos obtidos pelo método automático.

Considera-se que esta diferença de valores poderá estar relacionada com a fase em que o provete de aço se encontra, quando se efetuam as determinações da extensão total na força máxima. Isto é, os valores da extensão total na força máxima obtidos a partir dos extensómetros são determinados durante o ensaio de tração, ou seja, o provete encontra-se com uma deformação imposta (fase plástica) no momento em que a força máxima é registada e a correspondente extensão é lida. Por outro lado, quando é feita a medição da deformação do provete após rotura (conforme estipulado na norma (ISO 6892-1, 2009)), a extensão medida inclui a deformação que o provete sofre desde que é atingida a força máxima até à rotura.

Para um melhor entendimento dos valores obtidos da extensão total na força máxima através deste método de ensaio apresenta-se, de seguida, a Figura 59 que ilustra o modo da determinação da extensão total na força máxima através do método automático e a Figura 60 que representa o modo da determinação da extensão total na força máxima através do método manual.

A análise da Figura 59 permite constatar que, pelo método automático, o valor da extensão total na força máxima (A_{gt}) do provete de aço é determinado no instante em que é registada a força máxima que é possível aplicar ao provete em questão, durante o ensaio de tração.

Na Figura 60 constata-se que na determinação do valor da extensão total na força máxima recorrendo ao método manual, este é obtido através da soma do valor determinado da extensão permanente na força de rotura do provete com a componente da extensão elástica do provete.

Verifica-se ainda que ao longo do ensaio de tração e após ser efetuado o registo da capacidade da força máxima do provete, continua a ocorrer um aumento significativo da

deformação do provete até se atingir a fase de rotura. Portanto, este aumento de deformação está associado ao desenvolvimento de estrição em várias zonas ao longo de todo o comprimento livre do provete antes de ocorrer a rotura numa dessas zonas. Ou seja, a deformação vai aumentando progressivamente até ocorrer uma estrição com maior intensidade numa determinada zona o que, naturalmente, leva à concretização da rotura do provete.

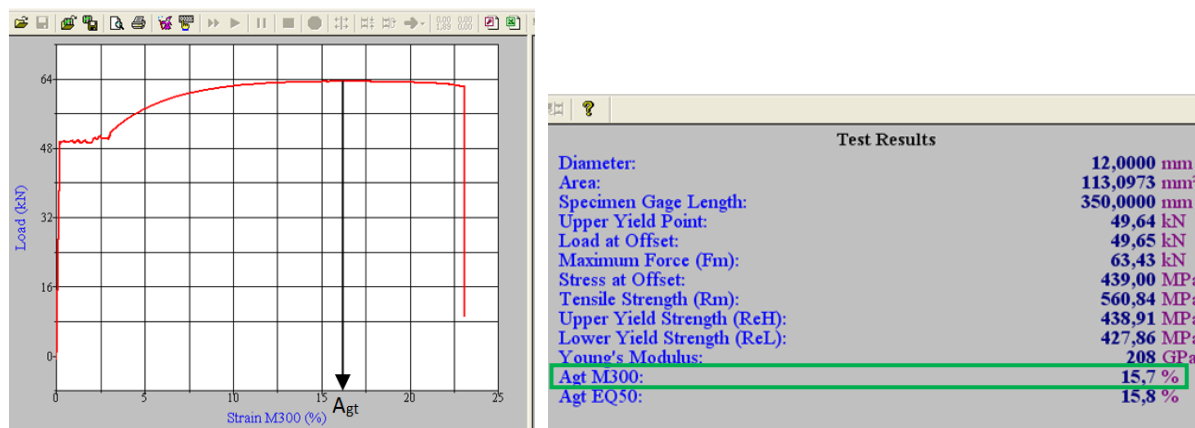


Figura 59 - Valor da extensão total na força máxima determinado pelo software PARTNER com base nos registos do extensómetro INSTRON

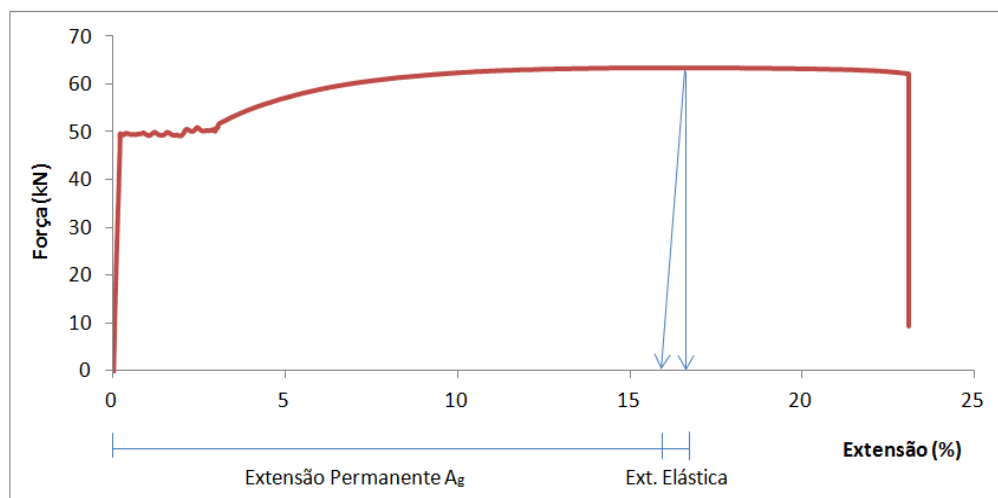


Figura 60 - Valor da extensão total na força máxima determinado pelo método manual

Através desta análise, pode-se concluir que a diferença dos valores obtidos para a extensão total na força máxima através do método automático e do método manual está relacionada com o aumento da deformação ao longo do provete que ocorre após ter sido atingida a força máxima.

Face aos resultados obtidos constata-se também que os varões de aço da classe de resistência A400 NR SD apresentam valores superiores em relação aos varões de aço da classe de resistência A500 NR SD. Este facto está associado à metodologia usada pelas siderurgias no tratamento térmico destes produtos. Os varões de aço da classe de resistência A500 NR SD produzidos com a tecnologia *Tempcore* são sujeitos a um

arrefecimento superficial de duração curta na caixa de arrefecimento (à saída do rolo de laminagem), através de um jacto de água a alta pressão. Em consequência da curta duração da têmpera, obtém-se um produto com maior resistência mas com menor ductilidade. Através deste processo de tratamento térmico o produto fica com características mecânicas diferentes na camada superficial e na camada interior.

A colocação dos dois extensómetros no centro do provete permite também verificar que existe, em geral, uma boa concordância nos resultados obtidos pelos dois equipamentos. Os resultados associados aos provetes da classe de resistência A400 NR SD do diâmetro de 10 mm (gama baixa) e do diâmetro de 12 mm (gama média) apresentam uma diferença maior entre a medição efetuada pelos dois extensómetros. Esta diferença de valores está associada a pequenos escorregamentos ocorridos no extensómetro EPSILON no decorrer de alguns ensaios de tração. A análise cuidada dos registos dos ensaios permite concluir que estes pequenos escorregamentos estão relacionados com a dificuldade de garantir o contacto perfeito entre o extensómetro e o provete de aço. Para melhor se compreender esta dificuldade, é preciso ter em consideração que o provete tem nervuras transversais cujo espaçamento nem sempre é compatível com a base do extensómetro, podendo suceder que as lâminas do extensómetro (vulgo “facas”) fiquem colocadas sobre as nervuras transversais do provete, conforme representado na Figura 61, originando assim um ligeiro incremento do escorregamento medido quando, durante o ensaio, as lâminas do extensómetro transitam entre uma zona com e sem nervuras transversais.

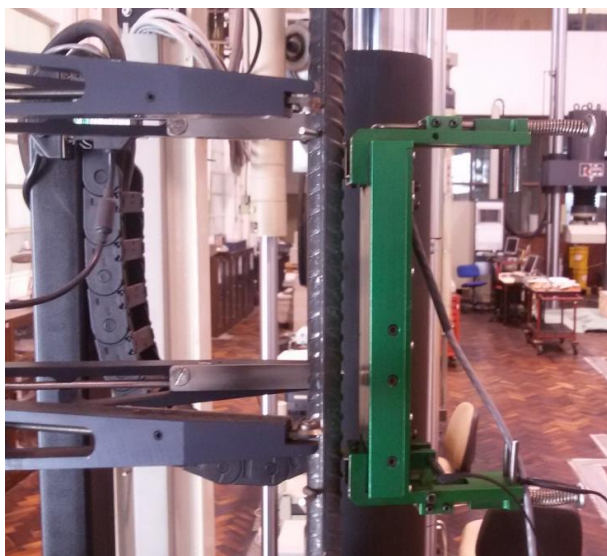


Figura 61 - Representação do sistema de fixação do extensómetro EPSILON ao provete de aço

Em suma, a utilização em paralelo da medição manual e da medição automática permite constatar que os resultados obtidos pelo método manual conduziram à aceitação de todos os provetes face à especificação do produto. No entanto, se a aceitação do produto se baseasse na medição pelo método automático teriam sido obtidos resultados não conformes em provetes da classe de resistência A500 NR SD do diâmetro de 8 mm, 10 mm e 12 mm face à especificação do produto.

6.2.2. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA INSTALAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS NA ZONA SUPERIOR E INFERIOR DO PROVETE

Tendo em vista a análise da variação da extensão total na força máxima ao longo do comprimento útil do provete procedeu-se à instalação dos extensómetros em duas zonas diferentes do provete.

Neste caso foram ensaiados varões de aço de duas gamas: (i) média (ii) e alta. Na gama média foram utilizados varões de aço de 12 mm de diâmetro e na gama alta utilizaram-se varões de aço com 32 mm de diâmetro.

Os resultados relativos à extensão total na força máxima apresentam-se no Quadro 18 e no Quadro 19.

Quadro 18 - Extensómetros em zonas distintas: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama média

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A_{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A_{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)
A400 NR	12	14,2	13,8	14,7
A500 NR	12	9,0	9,6	9,1
A400 NR SD	12	18,7	16,1	16,1

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

Quadro 19 - Extensómetros em zonas distintas: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama alta

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A_{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A_{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)
A500 NR SD	32	9,7	8,4	8,3

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

Mais uma vez, devido à diferença do processo de fabrico, verifica-se que os valores da extensão total na força máxima dos varões de aço da classe de resistência A400 NR e os varões de aço da classe de resistência A400 NR SD são superiores aos obtidos para os varões de aço da classe de resistência A500 NR e os varões de aço da classe de resistência A500 NR SD, independentemente da metodologia utilizada para a determinação desta grandeza.

Em face da localização dos extensómetros não ser a mesma, conta-se que existe uma maior diferença entre os resultados obtidos por estes dois equipamentos de medição (método automático), que é compatível com a explicação referida na secção anterior. Ou seja, o facto da deformação do provete não ser uniforme ao longo do seu comprimento da zona útil, conduz a que a determinação da extensão total na força máxima seja dependente da posição definida para a colocação do extensómetro conforme ilustrado na Figura 62a). Portanto, os resultados obtidos pelo método manual (Figura 62b)) são inferiores aos obtidos pelo método automático (dois extensómetros) quando aparentemente a deformação do provete é menos uniforme ao longo do seu comprimento. Quando tal não acontece, mantém-se a tendência para que os resultados obtidos para a extensão total na força máxima pelos extensómetros (método automático) sejam inferiores à medição efetuada pelo método manual.

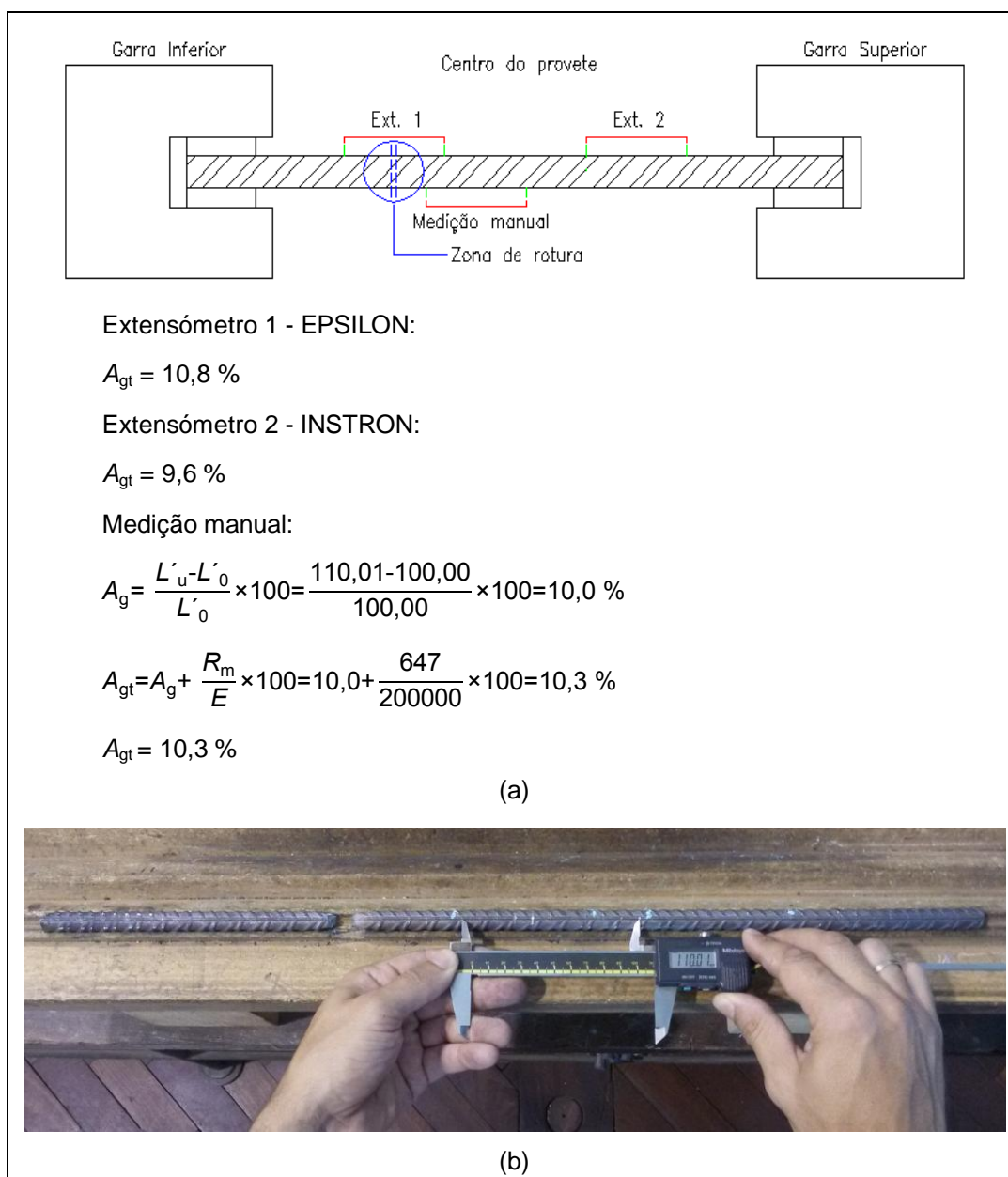


Figura 62 - (a) Representação esquemática das zonas de determinação da extensão total na força máxima A_{gt} ;
(b) Representação da medição da deformação do provete após rotura A_g

6.2.3. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE APÓS ROTURA EM QUATRO ZONAS DISTINTAS AO LONGO DO PROVETE

Neste estudo, sempre que possível, procedeu-se à medição da extensão total na força máxima do provete após rotura em quatro zonas distintas ao longo do provete, para se analisar de forma aprofundada a deformação ocorrida ao longo da zona útil do provete enquanto o mesmo é submetido a ensaio de tração.

As medições efetuadas no presente trabalho demonstram que, de um modo geral, a deformação dos provetes de varão de aço durante um ensaio de tração não é uniforme ao longo da sua zona útil. Esta condição ocorre devido a possíveis heterogeneidades do material e da geometria do varão de aço ao longo do seu comprimento. Este facto implica que, durante o ensaio de tração, o processo de estrição do varão de aço se possa iniciar em diferentes secções transversais do provete, para além da secção onde a rotura vai ocorrer. Portanto, se uma destas secções se localizar no interior do comprimento final entre referências utilizado (L'_u), o valor da extensão total na força máxima pode ser afetado pelas deformações ocorridas nessa secção, durante o seu processo de estrição. Além disso, quando o comprimento final entre referências utilizado (L'_u) se encontra na proximidade de uma zona perturbada pela influência de uma das amarrações do provete ou junto a uma zona de estrição na vizinhança da secção de rotura do provete, verifica-se também uma alteração do valor da extensão total na força máxima.

Estas constatações são suportadas pelas diferentes medições efetuadas ao longo da zona útil dos provetes, que se apresentam entre a Figura 63 e a Figura 66 e cujos resultados se encontram entre o Quadro 20 e o Quadro 23.



Figura 63 - Representação das zonas de medição: varão de aço A400 NR com 16 mm

Quadro 20 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A400 NR com 16 mm

Localização	L'_u (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)
L1G	118,18	18,5
L1R	113,94	14,2
L2R	114,67	14,9
L2G	115,16	15,4

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual



Figura 64 - Representação das zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 20 mm

Quadro 21 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 20 mm

Localização	L'_u (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)
L1G	110,77	11,0
L1R	116,71	17,0
L2R	113,07	13,3
L2G	111,69	12,0

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual



Figura 65 - Representação das zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 25 mm

Quadro 22 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A400 NR SD com 25 mm

Localização	L'_u (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)
L1G	113,34	13,6
L1R	114,21	14,5
L2R	117,09	17,4
L2G	115,66	15,9

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual



Figura 66 - Representação das zonas de medição: varão de aço A500 NR SD com 14 mm

Quadro 23 - Valores obtidos para a deformação do provete nas quatro zonas de medição: varão de aço A500 NR SD com 14 mm

Localização	L'_u (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)
L1G	114,10	14,4
L1R	112,52	12,9
L2R	110,01	10,4
L2G	109,84	10,2

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

Mesmo havendo apenas registo de medições num provete da classe A500 NR SD, verifica-se que, os varões de aço da classe de resistência A400 NR e A400 NR SD apresentam, em geral, uma maior diferença dos valores medidos face às restantes classes de resistência consideradas no presente trabalho.

Na prática constata-se que, em geral, os valores da extensão total na força máxima apresentam uma dispersão bastante mais elevada que os das outras características avaliadas através do ensaio de tração, tais como a tensão de cedência ou a tensão de rotura. A grande dispersão dos valores da extensão total na força máxima pode conduzir a uma estimativa demasiado conservativa do respetivo valor característico e a uma possível violação dos critérios de classificação do aço do varão numa dada classe de ductilidade.

6.2.4. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO PROVETE NA FORÇA MÁXIMA DE ENSAIO

Para se tentar esclarecer definitivamente a origem das diferenças registadas entre os métodos manual e automático procedeu-se à medição da deformação do provete na força máxima de ensaio por recurso a um paquímetro, em paralelo com a medição automática através dos dois extensómetros.

Estas medições foram efetuadas em varões de aço de duas gamas: (i) baixa (ii) e média. Neste caso a gama baixa é representada por varões de aço com 8 mm de diâmetro e a gama média é representada por varões de aço de 16 e 20 mm de diâmetro.

Os resultados obtidos para as diferentes hipóteses de determinação da extensão total na força máxima apresentam-se no Quadro 24 e no Quadro 25.

Quadro 24 - Medição com paquímetro na força máxima: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama baixa

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A_{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A_{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A_{gt} $F_{máx}$ ⁽⁴⁾ (%)
A500 NR SD	8	12,3	11,2	11,4	11,2

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

⁽⁴⁾ Extensão na força máxima de ensaio

Quadro 25 - Medição com paquímetro na força máxima: valor médio dos resultados obtidos para a extensão total na força máxima dos varões de aço da gama média

Tipo de aço	Diâmetro (mm)	A_{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A_{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A_{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A_{gt} $F_{máx}$ ⁽⁴⁾ (%)
A400 NR SD	16	15,2	13,4	13,4	13,4
	20	14,7	13,4	13,6	13,4

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

⁽⁴⁾ Extensão na força máxima de ensaio

Tal como exposto no Capítulo 5, nesta fase a determinação da extensão total na força máxima através do método manual foi feita de duas formas diferentes. Ou seja, para além de se determinar a extensão após rotura conforme preconizado na norma de referência (ISO 6892-1, 2009), procedeu-se também à determinação da extensão total na força máxima com recurso a um paquímetro no instante em que se encontra instalada a força máxima do ensaio de tração.

Os resultados obtidos revelam que existe uma boa concordância entre a medição automática (extensómetro INSTRON e extensómetro EPSILON) e a medição manual feita com paquímetro na força máxima do ensaio de tração. Logo, estes resultados demonstram que, fazendo a medição no mesmo instante se obtêm resultados idênticos. Portanto, as diferenças obtidas entre a medição manual e a medição automática (extensómetros) estão em boa parte associadas ao fenómeno anteriormente referido. Isto é, à existência de várias zonas onde o processo de estirção se encontra já em curso ao longo de todo o comprimento livre do provete antes de ocorrer a rotura numa determinada zona, o que se traduz num aumento significativo de deformações plásticas em secções do provete após ter sido atingida a força máxima.

Nestes ensaios verifica-se também que se mantêm as diferenças já anteriormente referidas entre a determinação da extensão total na força máxima pela medição manual (normativa) e pela medição automática.

Constata-se ainda que os resultados da extensão total na força máxima determinados pelo método manual se mantêm superiores aos da extensão total na força máxima determinados pelo método automático (em ambos os extensómetros) cerca de 1,5 %. Mais uma vez, os resultados obtidos para os varões de aço da classe de resistência A400 NR SD são superiores aos obtidos para os varões de aço da classe de resistência A500 NR SD, independentemente do método.

Assim, considera-se que importa refletir sobre a metodologia de ensaio mais adequada. Caso a aceitação destes produtos continue a ser efetuada com base no método manual julga-se que deverá de ser equacionada a hipótese dos valores de referência terem que ser ajustados.

Finalmente, importa salientar que no âmbito dos processos de certificação de varões de aço para armaduras de betão armado têm vindo a ser reportadas diferenças mais ou menos sistemáticas para esta propriedade entre os resultados dos ensaios realizados em paralelo pelo LNEC-EM e pelos fabricantes. Tendo em conta que as fábricas recorrem sistematicamente à realização dos ensaios pelo método automático, considera-se que as diferenças encontradas podem em parte estar associadas à diferença da metodologia usada para a determinação da extensão total na força máxima.

6.3. SISTEMATIZAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

Nesta secção apresenta-se um resumo dos resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados. Os quadros seguintes (Quadro 26 a Quadro 28) incluem para cada diâmetro, tipo de aço e condição de ensaio, o valor médio obtido para as diferentes determinações da extensão total na força máxima. Assim, em cada linha apresenta-se também o número de ensaios realizados correspondente a cada uma das determinações.

Portanto, na coluna correspondente a cada diâmetro ensaiado, para além do número de provetes, incluem-se os resultados da extensão total na força máxima obtidos pelos extensómetros (A_{gt} M300 e A_{gt} EQ 50), os resultados obtidos pelo método manual (A_{gt} Manual) bem como os resultados obtidos a partir da medição manual da deformação do provete na força máxima de ensaio (A_{gt} $F_{máx}$).

Quadro 26 - Valor médio da extensão total na força máxima em função do diâmetro e tipo de aço para as diferentes condições de ensaio - gama baixa

Condições de ensaio	Tipos de aço	Número de ensaios	Diâmetros (mm)											
			6				8				10			
			N.º de provetes				N.º de provetes				N.º de provetes			
			A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)
Instalação dos extensómetros no centro do provete	A500 ER	20	20				-				-			
			4,5	4,1	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR	20	-				20				-			
			-	-	-	-	9,3	9,2	9,2	-	-	-	-	-
	A400 NR SD	20	-				-				20			
			-	-	-	-	-	-	-	-	15,5	14,2	15,0	-
	A500 NR SD	50	-				20				30			
			-	-	-	-	11,0	10,3	10,4	-	11,2	10,3	10,3	-
Instalação dos extensómetros nas zonas superior e inferior do provete	A400 NR	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR SD	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR SD	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medição da deformação do provete na força máxima de ensaio	A400 NR SD	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR SD	10	-				10				-			
			-	-	-	-	12,3	11,2	11,4	11,2	-	-	-	-

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

⁽⁴⁾ Extensão manual na força máxima de ensaio

Quadro 27 - Valor médio da extensão total na força máxima em função do diâmetro
e tipo de aço para as diferentes condições de ensaio - gama média

Condições de ensaio	Tipos de aço	Número de ensaios	Diâmetros (mm)															
			12				14				16				20			
			N.º de provetes				N.º de provetes				N.º de provetes				N.º de provetes			
			A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)
Instalação dos extensómetros no centro do provete	A500 ER	-	-				-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR	30	10				-				20				-			
			17,5	15,9	15,9	-	-	-	-	-	16,3	13,2	13,1	-	-	-	-	-
	A500 NR	-	-				-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instalação dos extensómetros superior e inferior do provete	A400 NR	10	10				-				-				-			
			14,2	13,8	14,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR	10	10				-				-				-			
			9,0	9,6	9,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR SD	10	10				-				-				-			
			18,7	16,1	16,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Deformação provete força máx. ensaio	A400 NR SD	20	-				-				10				10			
			-	-	-	-	-	-	-	-	15,2	13,4	13,4	13,4	14,7	13,4	13,6	13,4
	A500 NR SD	-	-				-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽⁴⁾ Extensão manual na força máxima de ensaio

Quadro 28 - Valor médio da extensão total na força máxima em função do diâmetro e tipo de aço para as diferentes condições de ensaio - gama alta

Condições de ensaio	Tipos de aço	Número de ensaios	Diâmetros (mm)											
			25				32				40			
			N.º de provetes				N.º de provetes				N.º de provetes			
			A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)	A _{gt} Manual ⁽¹⁾ (%)	A _{gt} M300 ⁽²⁾ (%)	A _{gt} EQ 50 ⁽³⁾ (%)	A _{gt} Fmáx ⁽⁴⁾ (%)
Instalação dos extensómetros no centro do provete	A500 ER	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR	10	10				-				-			
			9,2	8,9	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR SD	10	10				-				-			
			15,7	13,7	14,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR SD	20	20				-				-			
			11,7	9,7	9,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instalação dos extensómetros nas zonas superior e inferior do provete	A400 NR	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A400 NR SD	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR SD	10	-				10				-			
			-	-	-	-	9,7	8,4	8,3	-	-	-	-	-
Medição da deformação do provete na força máxima de ensaio	A400 NR SD	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A500 NR SD	-	-				-				-			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Extensão após rotura - método manual

⁽²⁾ Extensómetro INSTRON M300 - método automático

⁽³⁾ Extensómetro EPSILON - método automático

⁽⁴⁾ Extensão manual na força máxima de ensaio

6.4. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA

Nas duas secções seguintes são apresentados os resultados obtidos da avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima por ambos os métodos aplicados neste trabalho. Os resultados apresentados nestas secções dizem respeito a um patamar nominal de A_{gt} em torno de 8%, que em regra se obtêm por ensaio de varões de aço da classe de resistência A500 NR e A500 NR SD, que se apresentam no Anexo C.

Neste estudo foram também elaboradas tabelas de incerteza de medição para valores extremos da gama de medição usual da grandeza A_{gt} , designadamente, 5 % (como é o caso do ensaio de varões de aço da classe de resistência A500 ER) e 15 % (por exemplo, no caso do ensaio de varões de aço da classe de resistência A400 NR e A400 NR SD). Os resultados obtidos permitem constatar que a magnitude da incerteza de medição da grandeza A_{gt} não varia significativamente na gama de medição supracitada. Deste modo, os valores de incerteza de medição apresentados em seguida podem ser considerados representativos da melhor capacidade de medição da extensão total na força máxima.

A elaboração das tabelas que se apresentam de seguida, é suportada na formulação probabilística das diferentes componentes de incerteza associadas às grandezas de entrada e na sua propagação para a grandeza de saída (extensão total na força máxima) por aplicação da Lei de Propagação de Incertezas, conforme previsto no guia ISO-GUM (IOS, 2008).

6.4.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA – MÉTODO AUTOMÁTICO

Uma vez que através do método automático os valores da extensão total na força máxima foram determinados recorrendo à utilização de dois extensómetros: (i) extensómetro EPSILON (ii) e o extensómetro INSTRON. No Quadro 29 e no Quadro 30 são apresentados os resultados da avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima para os dois instrumentos referidos.

Quadro 29 - Resultados da avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do extensómetro EPSILON

Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	F_dP	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	Graus de liberdade
	X_i			$u(x_i)$	C_i	$u_i(y)$	ν_i
$u(L'_{u})$	Comprimento final	-	-	0,010 mm	$1 \% \cdot \text{mm}^{-1}$	0,010 %	99
	Calibração do extensómetro	B	Normal	0,008 mm	1	0,008 mm	50
	Resolução	B	Retangular	0,003 mm	1	0,003 mm	50
	Desvios sistemáticos	B	Retangular	0,005 mm	1	0,005 mm	50
	Repetibilidade instrumental	A	Normal	0,004 mm	1	0,004 mm	9
$u(L'_{o})$	Comprimento inicial	-	-	0,038 mm	$-1,08 \% \cdot \text{mm}^{-1}$	0,041 %	50
	Diferença entre valor nominal e efetivo	B	Retangular	0,038 mm	1	0,038 mm	50

		Grandeza:	A_{gt}
		Estimativa:	7,90 %
$u(A_{gt})$	Incerteza padrão combinada:	0,04	%
ν_i	Graus de liberdade efetivos:	56	
k	Fator de expansão:	2,00	
$U_{95}(A_{gt})$	Incerteza expandida de medição (95%):	0,09	%

Quadro 30 - Resultados da avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do extensómetro INSTRON

Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	F_{dP}	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	Graus de liberdade
	X_i			$u(x_i)$	C_i	$u_i(y)$	ν_i
$u(L'_{10})$	Comprimento final	-	-	0,013 mm	1 %·mm ⁻¹	0,013 %	72
	Calibração do extensómetro	B	Normal	0,004 mm	1	0,004 mm	50
	Resolução	B	Retangular	0,003 mm	1	0,003 mm	50
	Desvios sistemáticos	B	Retangular	0,012 mm	1	0,012 mm	50
	Repetibilidade instrumental	A	Normal	0,002 mm	1	0,002 mm	9
$u(L'_{10})$	Comprimento inicial	-	-	0,018 mm	-1,08 %·mm ⁻¹	0,020 %	50
	Posicionamento do braço	B	Retangular	0,018 mm	1	0,018 mm	50

		Grandeza:	A_{gt}
		Estimativa:	7,90 %
$u(A_{gt})$	Incerteza padrão combinada:	0,02	%
ν_i	Graus de liberdade efetivos:	89	
k	Fator de expansão:	1,99	
$U_{95}(A_{gt})$	Incerteza expandida de medição (95%):	0,05	%

6.4.2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA – MÉTODO MANUAL

No método manual, conforme referido anteriormente, no processo de determinação da extensão total na força máxima estão envolvidas duas grandezas intermédias de medição: (i) a tensão de rotura à tração, R_m , (ii) e a extensão permanente na força máxima, A_g .

No Quadro 31 e no Quadro 32 são descritas as formulações probabilísticas das componentes de incerteza identificadas para as grandezas de entrada que suportam o cálculo das estimativas das grandezas tensão de rotura à tração, R_m , e extensão permanente na força máxima, A_g , sendo igualmente apresentado o resultado da sua combinação mediante aplicação do método ISO-GUM. Por sua vez, o Quadro 33 apresenta

a avaliação da incerteza associada à medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do método manual, suportada nos resultados obtidos para as grandezas R_m e A_g , bem como na componente de incerteza associada ao módulo de elasticidade E .

Quadro 31 - Resultados da avaliação da incerteza de medição da tensão de rotura à tração, R_m

Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	F _d P	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	Graus de liberdade
	X_i			$u(x_i)$	C_i	$u_i(y)$	ν_i
$u(F)$	Força máxima	-	-	0,07 kN	0,02 mm ⁻²	1,4 MPa	50
	Calibração da máquina	B	Normal	0,07 kN	1	0,07 kN	50
	Resolução	B	Retangular	0,0029 kN	1	0,0029 kN	50
$u(S_{o,nom})$	Área da secção do provete	-	-	0,30 mm ²	-0,013 kN·mm ⁻⁴	4,6 MPa	50
	Diferença entre área efetiva e nominal	B	Retangular	0,30 mm ²	1	0,30 mm ²	50

	Grandeza:	R_m	
	Estimativa:	662	MPa
$u(R_m)$	Incerteza padrão combinada:	4,8	MPa
ϑ_i	Graus de liberdade efetivos:	59	

Quadro 32 - Resultados da avaliação da incerteza associada à extensão permanente na força máxima, A_g

Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	F _d P	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	Graus de liberdade
	X_i			$u(x_i)$	C_i	$u_i(y)$	ν_i
$u(L'_u)$	Comprimento final	-	-	0,011 mm	1 %·mm ⁻¹	0,011 %	65
	Calibração do paquímetro	B	Normal	0,0095 mm	1	0,0095 mm	50
	Resolução	B	Retangular	0,0029 mm	1	0,0029 mm	50
	Repetibilidade instrumental	A	Normal	0,0050 mm	1	0,0050 mm	9
$u(L'_o)$	Comprimento inicial	-	-	0,29 mm	-1,09 %·mm ⁻¹	0,31 %	50
	Tolerância de marcação do provete	B	Retangular	0,29 mm	1	0,29 mm	50

		Grandeza:	A_g	
		Estimativa:	8,60	%
$u(A_g)$	Incerteza padrão combinada:	0,31		%
ϑ_i	Graus de liberdade efetivos:	50		

Quadro 33 - Resultados da avaliação da incerteza de medição da extensão total na força máxima, A_{gt} , através do método manual

Componente de incerteza	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	Graus de liberdade
	$u(x_i)$	C_i	$u_i(y)$	ν_i
$u(A_g)$	0,31 %	1	0,31 %	50
$u(R_m)$	4,8 MPa	0,0005 %·MPa ⁻¹	0,0024 %	52
$u(E)$	2,89 GPa	-0,0002 %·GPa ⁻¹	0,0005 %	50

Grandeza:		A_{gt}
Estimativa:		8,93 %
$u(A_{gt})$	Incerteza padrão combinada:	0,31 %
ν_i	Graus de liberdade efetivos:	50
k	Fator de expansão:	2,01
$U_{95}(A_{gt})$	Incerteza expandida de medição (95%):	0,63 %

6.4.3. ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Os resultados obtidos da avaliação da incerteza de medição da extensão total na força máxima para os dois métodos aplicados no presente trabalho, demonstram que existe uma diferença significativa entre valores de incertezas expandidas de medição. A determinação da extensão total na força máxima através do método automático utilizando o extensómetro EPSILON, apresenta um valor de incerteza expandida de medição de 0,09 % enquanto que com o extensómetro INSTRON é obtido um valor igual a 0,05 %. No caso da determinação da extensão total na força máxima através do método manual, o valor da incerteza expandida de medição é de 0,63 %. Deste modo, constata-se que o método manual apresenta uma incerteza de medição superior em uma ordem de grandeza relativamente ao método automático.

A análise de sensibilidade das contribuições de incerteza para os diferentes métodos estudados revela que a componente de incerteza associada à medição do comprimento inicial é dominante para o valor final da incerteza de medição da extensão total na força máxima. No caso do método automático com extensómetro EPSILON, esta componente provém da diferença encontrada entre o valor nominal (ISO 6892-1, 2009) utilizado nos cálculos (100 mm) e o valor efetivo que consta no certificado de calibração do extensómetro (99,867 mm). Já no caso do extensómetro INSTRON, a incerteza de medição do comprimento inicial resulta da exatidão associada ao posicionamento do braço no provete de ensaio, a qual foi estimada com base no certificado de calibração do equipamento de ensaio. No método de ensaio manual, a contribuição dominante da incerteza de medição da extensão total na força máxima está relacionada com a tolerância de marcação do provete na fase de preparação do ensaio que, de acordo com a especificação de ensaio, corresponde a ± 1 mm.

A Figura 67 exemplifica as diferenças de valores de incertezas de medição encontradas para os diferentes métodos de medição estudados tendo em conta os resultados obtidos para o caso de uma amostra aço da classe de resistência A500 NR SD. O interesse associado a este tipo de aço é justificado pelo facto das medições efetuadas a esta classe de resistência através do método automático terem revelado valores da extensão total na força máxima, A_{gt} , abaixo do limite especificado (valor característico mínimo: 8 %), contrariamente ao que aconteceu por aplicação do método manual.

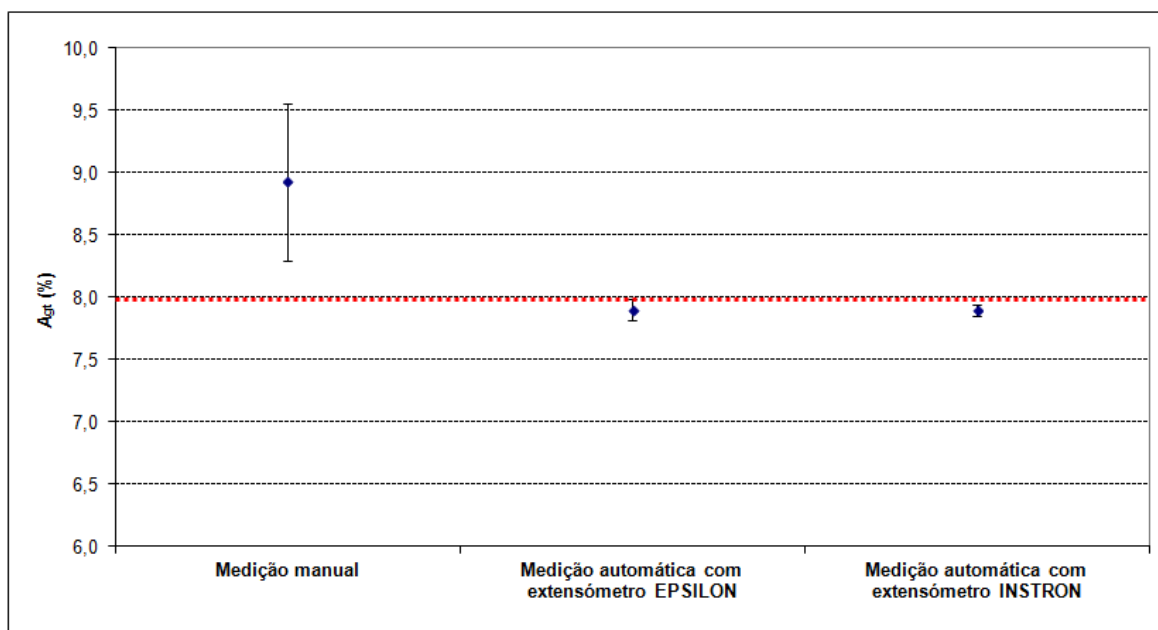


Figura 67 - Representação da incerteza expandida associada aos métodos de medição

A Figura 67 mostra que, para além de existir uma diferença significativa nos valores das estimativas obtidas da extensão total na força máxima através dos dois métodos (manual: 8,9 % e automático: 7,9 %), existe também uma diferença acentuada na incerteza de medição associada a cada um dos métodos. Portanto, se a aceitação do produto fosse efetuada pela medição através do método automático teriam sido obtidos resultados não conformes nesta amostra de varões de aço da classe de resistência A500 NR SD, face à especificação do produto. No entanto, como a aceitação do produto é suportada nos resultados obtidos pelo método manual, é possível verificar que estes conduzem à aceitação da amostra de aço face à especificação do produto.

Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

7.1. SÍNTESE DO ESTUDO DESENVOLVIDO

Nesta dissertação foi realizado um estudo sobre a ductilidade das armaduras de aço para betão armado mais concretamente sobre a influência do método de determinação da extensão total na força máxima.

Tendo em conta que se pretendia esclarecer a origem das diferenças existentes entre os dois métodos de determinação da extensão total na força máxima previstos na norma de referência, realizou-se no Laboratório de Ensaios e Metrologia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC-EM), um estudo de investigação sobre a determinação da extensão total na força máxima através de registo da deformação medida de forma automática (extensómetro) e da medição manual. Desta forma, caracterizou-se a resposta mecânica dos diferentes tipos de varões de aço para betão armado face à ação de forças axiais à tração e identificaram-se quais os parâmetros que são mais relevantes na determinação da capacidade de deformação.

O estudo prévio do estado do conhecimento relativo às matérias em questão permitiu fundamentar a campanha experimental no que respeita à seleção das metodologias de ensaio e, posteriormente justificar os resultados que foram sendo obtidos no decorrer do estudo.

Este trabalho envolveu a realização de uma campanha de 310 ensaios de tração, realizados segundo as normas europeias de referência (ISO 15630-1, 2010) e (ISO 6892-1, 2009) e de acordo com as especificações de produto que se encontram vigentes em Portugal (Especificação E 449, 2010) (Especificação E 450, 2010) (Especificação E 455, 2010) (Especificação E 460, 2010) (Especificação E 456, 2011), e que se baseiam nas exigências europeias.

A campanha experimental definida abrangeu a realização de ensaios em cinco tipos de aço, de nove diâmetros diferentes e considera-se que permitiu contribuir para um aumento do conhecimento da influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado e iniciar novos caminhos de estudo e pesquisa, com base nos resultados obtidos.

7.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos a partir da determinação da extensão total na força máxima com instalação dos extensómetros no centro dos provetes permite concluir que os valores obtidos pelo método manual são, de modo geral, sempre superiores aos valores obtidos pelo método automático. A realização destes ensaios permitiu esclarecer que a principal razão para a existência desta diferença significativa de valores é o facto da extensão total na força máxima ser determinada em diferentes estádios de deformação do provete de aço.

No que respeita à determinação da extensão total na força máxima através da medição da deformação do provete de aço na força máxima de ensaio de tração, os resultados obtidos demonstram que existe uma boa concordância entre a medição automática e a medição manual. Tal sucede porque a extensão total na força máxima é, deste modo, determinada no instante em que o provete tem imposta a mesma deformação.

A determinação, em paralelo, da extensão total na força máxima através dos dois métodos previstos na norma de referência permitiu ainda concluir que existe uma menor dispersão dos valores da extensão total na força máxima obtidos quando a medição é feita de forma automática. Para além do esclarecimento da origem das diferenças associadas ao método de ensaio, este estudo, ao recorrer a ambos os métodos de medição (automática e manual), garante ainda, de forma robusta, a validação dos dois equipamentos de medição automática (EPSILON e INSTRON) usados tendo em vista a sua incorporação no sistema de gestão da qualidade da Unidade de Produtos Metálicos do LNEC-EM.

Constatou-se também, em face dos resultados obtidos para as medições efetuadas em diferentes zonas dos provetes, que a deformação dos provetes não é uniforme ao longo da sua zona útil, devido a possíveis heterogeneidades do material e da geometria do varão de aço ao longo do seu comprimento, o que se traduz num aumento da estimativa de incerteza associada ao valor exato da extensão total na força máxima.

Refira-se ainda que a campanha experimental deste estudo visou essencialmente contribuir para a eliminação das discordâncias atualmente existentes entre métodos de uma mesma norma de referência. Desta forma, considera-se que este estudo poderá promover a harmonização dos documentos normativos existentes sobre esta matéria e ainda apoiar outros estudos com vista à melhoria dos critérios de controlo utilizados no âmbito da certificação dos varões de aço para betão armado, por haver agora um melhor conhecimento sobre esta propriedade.

7.3. RECOMENDAÇÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Na sequência do estudo desenvolvido, recomendam-se algumas medidas para aumentar o nível de confiança nos valores da extensão total na força máxima obtidos através dos ensaios de tração realizados na Unidade de Produtos Metálicos do LNEC-EM:

- Adoção de um critério unificado para a execução do ensaio de tração especificando nomeadamente:
 - o posicionamento do produto metálico na máquina de ensaios mecânicos, garantindo que as nervuras longitudinais do provete se encontraram alinhadas com as garras da máquina;

- o método de instalação do extensómetro no provete para o cálculo da extensão total na força máxima;
 - a velocidade de ensaio;
 - o comprimento inicial entre referências.
- Calibração do equipamento de marcação dos provetes de aço, com o objetivo de reduzir a estimativa de incerteza associada à medição da extensão total na força máxima pelo método manual;
 - Integrar nos boletins de ensaio a determinação da extensão total na força máxima através do método automático, uma vez que apresenta uma incerteza de medição inferior em uma ordem de grandeza face ao método manual;
 - Recorrer de forma sistemática e para os ensaios correntes à utilização do extensómetro automático de alta resolução (INSTRON M300);
 - Equacionar a substituição das garras do sistema de amarração hidráulico disponível para a realização de ensaios de tração de varões de aço de 25 mm de diâmetro, tendo em conta que as garras disponíveis para este diâmetro não garantem a completa fixação do provete quando este é submetido a forças elevadas.

Os resultados obtidos neste estudo permitem ainda abrir novos caminhos de investigação que certamente contribuirão para o avanço do conhecimento nesta área, uma vez que os registos agora disponíveis podem continuar a ser explorados.

Nesse sentido, considera-se que os registos existentes poderão, por exemplo, suportar propostas de alteração normativa que tenham em vista a obtenção de resultados similares independentemente do método de ensaio utilizado. A este nível salienta-se que o estudo efetuado se baseou nas disposições normativas aplicáveis à determinação da extensão total na força máxima das atuais normas de referência (ISO 6892-1, 2009) e (ISO 15630-1, 2010). No entanto, como a versão de 2002 da (ISO 15630-1, 2002) definia que a determinação da extensão total na força máxima podia ser feita através do valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui 0,5% em relação ao valor da força máxima obtida durante o ensaio de tração, considera-se que os registos do presente trabalho podem permitir apoiar ou não propostas de alteração dos documentos normativos em vigor, através da participação do LNEC na Comissão Técnica do IPQ relativa a Aços e Ferros Fundidos (CT 12).

A ideia principal que levou à conceção e realização deste trabalho foi estudar e analisar as propriedades relacionadas com a ductilidade das armaduras de aço para betão armado e avaliar a influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima. Contudo, e independentemente dos resultados atingidos, não se ambiciona com este trabalho limitar contribuições teóricas ou pensamentos que têm abordado o assunto, mas continuar um percurso de reflexão e debate sobre a temática da ductilidade das armaduras, pois considera-se que o aumento do conhecimento acerca das metodologias de ensaio e dos critérios de medição permitirá quantificar cada vez com maior rigor os parâmetros que definem o comportamento dos materiais e consequentemente o comportamento das estruturas nas quais estes se encontram inseridos.

Finalmente, para aprofundar o conhecimento sobre este tipo de materiais, considera-se que seria útil continuar a sistematizar os resultados dos ensaios de varões de aço para betão armado realizados na Unidade de Produtos Metálicos tendo em vista, não só o incremento da informação disponível mas também assegurar que as exigências definidas nas Especificações Técnicas dos produtos são adequadas à utilização pretendida para estes materiais.

8

Referências Bibliográficas

C

CETNO (2003/04). *Parte – III. Materiais metálicos*, Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica.

D

D'Arga e Lima, J. (1983). *Betão Armado (REBAP 1983). Armaduras. Volume 1 – Aspectos gerais*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Decreto-Lei n.º 349-C/83, de 30 de junho de 1983. *REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*.

Decreto-Lei n.º 128/99, de 21 de abril de 1999.

Decreto-Lei n.º 28/07, de 12 de fevereiro de 2007.

Decreto-Lei n.º 301/07, de 23 de agosto de 2007.

Decreto-Lei n.º 390/07, de 10 de dezembro de 2007.

E

Especificação E 449 (2010). *Varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 450 (2010). *Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 455 (2010). *Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 456 (2011). *Varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 458 (2011). *Redes eletrossoldadas para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 460 (2010). *Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 478 (2008). *Fios lisos de aço A500 EL. Campo de aplicação, características e ensaios*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 479 (2012). *Redes eletrossoldadas de pequeno diâmetro. Campo de aplicação, características e ensaios*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Especificação E 480 (2011). *Treliças eletrossoldadas para armaduras de betão armado. Campo de aplicação, características e ensaios*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

EN 10080 (2005). *Aços para armaduras de betão armado. Aços soldáveis para betão armado. Generalidades*, Instituto Português da Qualidade.

E0215 v.01 (2008). *Procedimento de ensaio metrológico. Estufas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

F

Filipe, J., Mendes, R., Louro, A., Baptista, A. (2014). *Influência do método de ensaio nos valores da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado*, JPEE 2014.

Fapricela (2015). *Tratamento mecânico*. Acedido em 15 de dezembro de 2015, disponível em: (<http://www.fapricela.pt/>).

G

GASIN (2015). *Altos-Fornos com Convertidores*. Acedido em 16 de julho de 2015, disponível em: (<http://www.gasin.com/industries/Metals/IronSteel-Production/Foundry.aspx>).

GASIN (2015). *Fornos de arco elétrico*. Acedido em 16 de julho de 2015, disponível em: (<http://www.gasin.com/industries/Metals/IronSteel-Production/Foundry.aspx>).

I

ISO 6892-1 (2009). *Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature*, International Organization for Standardization.

ISO 15630-1 (2010). *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire*, International Organization for Standardization.

ISO 15630-1 (2002). *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire*, International Organization for Standardization.

IPQ (2012). *Vocabulário Internacional de Metrologia. Conceitos fundamentais e gerais e termos associados*, Instituto Português da Qualidade.

IOS (2008). *Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization.

INSTRON (2008). *PARTNERTM – Materials Testing Software. Version 8.2a*, INSTRON.

L

LNEC (2015). *Lista de Documentos de Classificação 63 – 3. Documentos de Classificação de aços para armaduras de betão armado em vigor em Portugal*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Louro, A., Pipa, M. Santos, S. (2002). *Qualidade dos aços para betão em Portugal. Normalização e Certificação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Louro, A. (2014). *Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas*, Dissertação de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa.

Louro, A., Falcão, J., Pipa, M. (2006). *Qualidade dos aços para betão em Portugal. Perspetivas futuras*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

M

Moreira, C., André, J., Louro, A., Falcão, J., Pipa, M. (2008). *Garantia da Qualidade das Armaduras para Betão Armado*, BE2008 – Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008.

MA/MEC.PRC.0104.00 (2014). *Procedimento de Calibração. Instrumentos de Pesagem não Automáticos (Calibração in situ)*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

MA/MEC.PRC.3301.00 (2013). *Procedimento de Calibração. Transdutores de deslocamento (in situ)*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

MA/MEC.PRC.3501.00 (2013). *Procedimento de Calibração. Extensómetros com indicador dedicado (in situ)*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

MA/MEC.PRC.0901.00 (2013). *Procedimento de Calibração. Paquímetros*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Megasa (2015). *Varões laminados a quente*. Acedido em 15 de dezembro de 2015, disponível em: (<http://www.megasa.com/gamaProductos.php>).

Megasa (2015). *Redes eletrossoldadas*. Acedido em 15 de dezembro de 2015, disponível em: (<http://www.megasa.com/gamaProductos.php>).

N

NP EN 1990 (2009). *Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1991-1-1 (2009). *Eurocódigo 1 – Ações em estruturas Parte 1-1. Ações gerais, pesos volúmicos, pesos próprios e sobrecargas em edifícios*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1992-1-1:2010/AC:2012 (2012). *Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão Parte 1-1. Regras gerais e regras para edifícios*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1998-1:2010/A1:2013 (2013). *Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos Parte 1. Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN ISO 7500-1 (2006). *Materiais metálicos. Verificação de máquinas de ensaios estáticos uniaxiais Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão. Verificação e calibração do sistema de medição da força*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN ISO 9513 (2014). *Materiais metálicos. Calibração dos sistemas extensométricos utilizados em ensaios uniaxiais*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 206-9 (2010). *Betão Parte 9 – Regras adicionais para betão autocompactável (BAC)*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 13369 (2015). *Regras gerais para produtos prefabricados de betão*, Instituto Português da Qualidade.

NP ENV 13670-1 (2007). *Execução de estruturas em betão Parte 1: Regras gerais*, Instituto Português da Qualidade.

P

Pipa, M. (1993). *Ductilidade de elementos de betão armado sujeitos a ações cíclicas. Influência das características mecânicas das armaduras*, Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa.

Pipa, M., Vercesi, A. (1996). *Cyclic Tests of Grade B400 and B500 Tempcore Bars, Prenormative Research in Support of Eurocode 8 (PREC8), Human Capital and Mobility Program (HCM)*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Pipa, M. (1999). *Investigation on The Behaviour of 16mm and 8mm Bars to Fulfil Ductility and Weldability Requirements in Seismic Applications, ECSC 1998 Steel Research Project N. 7210-PR-111, Report on the 1999 Research Activities*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Pipa, M. (2000). *Investigation on The Behaviour of 20mm Bars to Fulfil Ductility and Weldability Requirements in Seismic Applications, ECSC 1998 Steel Research Project N. 7210-PR-111, Interim Report on the 1st Semester 2000 Research Activities*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Pipa, M. (2001). *Investigation on The Behaviour of 20mm Bars to Fulfil Ductility and Weldability Requirements in Seismic Applications, ECSC 1998 Steel Research Project N.*

7210-PR-111, *Interim Report on the 1st Semester 2001 Research Activities*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Park, R., Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.

prEN 10080 (2015). *Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. General*, ECISS/TC 104/WG 1 N 287.

prEN 10138-1 (2011). *Prestressing steels – Part 1: General requirements*, ECISS/TC 104 N 51.

PE.PSG.01 Ed. 7 (2009). *Concessão e acompanhamento da certificação. Varão de aço para armaduras de betão armado*, CERTIF - Associação para a Certificação.

PE.PSG.06 Ed. 9 (2013). *Concessão e acompanhamento da certificação. Varão de aço de ductilidade especial para armaduras de betão armado*, CERTIF - Associação para a Certificação.

PE.PSG.10 Ed. 5 (2013). *Concessão e acompanhamento da certificação. Varão de aço para armaduras de betão armado A500 ER*, CERTIF - Associação para a Certificação.

R

Relatório 204/2015 - DE/Chefia (2015). *Estratégia de I&D&I 2013-2020 do Departamento de Estruturas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Relatório 331/2009 - DE/NCE (2009). *Avaliação das incertezas associadas aos resultados dos ensaios de tração realizados no Laboratório de Ensaios de Produtos Metálicos*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Relatório 202/2002 - NCE (2002). *Aços de ductilidade especial produzidos pela SN-EPL caracterização através de ensaios cíclicos alternados*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Rocha, J. (2009). *Aços de Ductilidade Especial em Estruturas de Betão Armado – Aplicação ao Dimensionamento de Ponte Rodoviária*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.

Ribeiro, A., Martins, L. (2009). *Método de confirmação metrológica de instrumentação científica. Uma abordagem probabilística*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Regulamento (UE) n.º 305/11, de 9 de março de 2011. *Regulamento dos Produtos de Construção (RPC)*, Parlamento Europeu e do Conselho.

S

Seabra, A. (1981). *Metalurgia Geral, Volume I e II*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Smith, W. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, Terceira Edição, McGRAW-HILL.

ANEXO A



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
Centro de Instrumentação Científica
Laboratório Central de Apoio Metrológico



Boletim nº **0314/2014-UMA**
Pág. **1/3**
Pedido nº
Visto
Carlos Oliveira Costa
Diretor do CIC

Cliente / Customer

Designação (Customer name) **DE / NCE / UPM**
Endereço (Address) **LNEC**

Equipamento em ensaio metrológico / Equipment under testing

Designação (Name) **Estufa**
Stove
Marca e modelo (Brand and model) **SOLO / 102-STF/120/D**
Dados de identificação (Id. data) **.343.15**
Resolução / Intervalo med. (Resolution / Meas. Interval) **1 °C**

Equipamento padrão de referência / Reference standards

Designação (Name) **Termómetros PRTs 100 ohm e ponte de medição**
PRTs 100 ohm and bridge
Marca e modelo (Brand and model) **ASL / --- ; ASL / F250 MK II**
Dados de identificação (Id. data) **500.15 ; 502.15 ; 504.15 ; 509.15 ; 398.15 ; 327.15.**
Rastreabilidade (Traceability) **A SPRTs de 25 ohm rastreados ao IPQ (Portugal).**
SPRTs 25 ohm with traceability to IPQ (Portugal).
Resolução / Intervalo med. (Resolution / Meas. Interval) **0,01 °C**

Dados complementares / Complementary data

Data de calibração (Calibration date) **2014-06-12** (aaaa-mm-dd)
(yyyy-mm-dd)
Local de calibração (Testing place) **Sala 2**
Temperatura ambiente (Ambient temperature) **≤ 25 °C**
Procedimento/Norma (Procedure / Norm) **Procedimento LNEC/LCAM E0215 v.01 (2008)**
Internal procedure LNEC/LCAM E0215 v.01 (2008)

Observações / Notes

Nada a assinalar.

Data de emissão: **Lisboa, 17 de junho de 2014**
(Date of issue)

O Operador
(The Technician)

(António Pais)

O Chefe do Laboratório
(Head of the Laboratory)

(Álvaro S. Ribeiro)

Av. do Brasil 101, 1700-066 LISBOA, PORTUGAL
Tel.: (+ 351) 21 844 30 00; Fax: (+ 351) 21 844 30 41

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
Centro de Instrumentação Científica
Laboratório Central de Apoio Metrológico

Boletim nº **0314/2014-UMA**

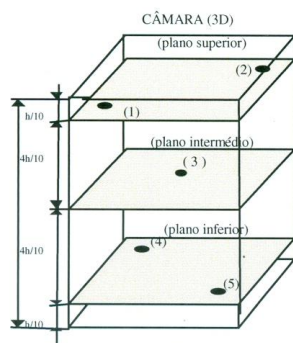
Pág. **2/3**

Pedido nº

Visto

Carlos Oliveira Costa
Chefe do GIC

Dimensões e localização dos termómetros / Dimensions and thermometers location

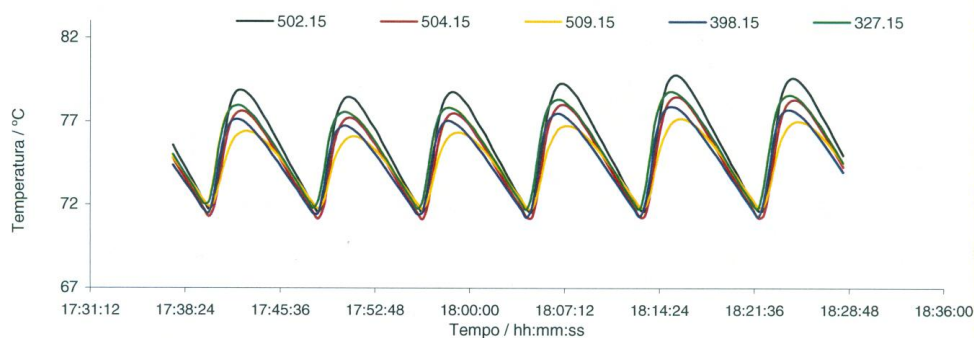


Localização (position inside chamber)	Ident. do sensor (sensor id.)
1	502.15
2	504.15
3	509.15
4	398.15
5	327.15

Resultados / Results

Valor programado (°C) / Set point (°C)	40	Valor lido (câmara) (°C) / Read value chamber (°C)					40
Temperaturas de referência / Reference temperatures (°C)							
Ident. do sensor / Sensor id	502.15	504.15	509.15	398.15	327.15		
Máximo / Maximum	79,79	78,50	77,18	77,91	78,82		
Mínimo / Minimum	71,54	71,17	71,74	71,27	71,75		
Valor Médio / Average	75,75	74,93	74,63	74,76	75,47		
Variação temporal (estabilidade) / Temperature temporal variation (stability) (°C)				8,25			
Variação espacial da temperatura / Temperature spatial variation (°C)				1,12			

Gráfico / Chart



Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
Centro de Instrumentação Científica
Laboratório Central de Apoio Metrológico

Boletim nº **0314/2014-UMA**

Pág. **3/3**

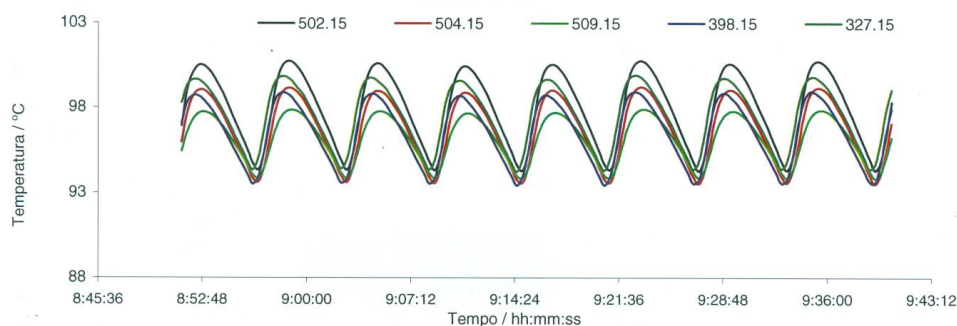
Pedido nº

Visto Carlos Oliveira Cos.
Diretor do CIC

Resultados (cont.) / Results (cont.)

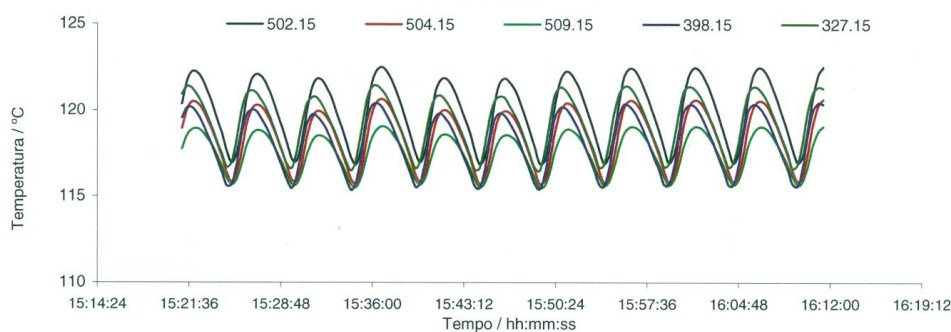
Valor programado (°C) / Set point (°C)	100					Valor lido (câmara) (°C) / Read value chamber (°C)	98				
Temperaturas de referência / Reference temperatures (°C)											
Ident. do sensor / Sensor id	502.15		504.15		509.15		398.15		327.15		
Máximo / Maximum	100,74		99,17		97,91		98,91		99,88		
Mínimo / Minimum	94,28		93,53		93,85		93,44		94,24		
Valor Médio / Average	97,89		96,68		96,14		96,51		97,48		
Variação temporal (estabilidade) / Temperature temporal variation (stability) (°C)							6,46				
Variação espacial da temperatura / Temperature spatial variation (°C)							1,75				

Gráfico / Chart



Valor programado (°C) / Set point (°C)	120					Valor lido (câmara) (°C) / Read value chamber (°C)	119				
Temperaturas de referência / Reference temperatures (°C)											
Ident. do sensor / Sensor id	502.15		504.15		509.15		398.15		327.15		
Máximo / Maximum	122,52		120,66		119,06		120,45		121,46		
Mínimo / Minimum	116,85		115,70		115,50		115,35		116,50		
Valor Médio / Average	119,92		118,40		117,49		118,13		119,24		
Variação temporal (estabilidade) / Temperature temporal variation (stability) (°C)							5,67				
Variação espacial da temperatura / Temperature spatial variation (°C)							2,44				

Gráfico / Chart



Observações finais / final notes

A aquisição das temperaturas decorreu em intervalos de tempo de 12 s. A estabilização em cada patamar foi de (pelo menos) 1 h. A incerteza de medição expandida (95%), associada à medição das temperaturas é igual a $\pm 0,09$ °C (com $k=2,00$ de acordo com o documento EA-4/02). Os valores de incerteza apresentados respeitam apenas aos padrões de referência utilizados.

The acquisition was carried out considering time intervals of 12 s. The stabilization at each testing point was (at least) 1 h. The expanded measurement uncertainty (95%) related to the temperature measurement is equal to $\pm 0,09$ °C (with $k = 2,00$ according to EA-4/02). The uncertainty values presented can only be related with the reference standards used.



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0541/2014-UMA

Pág. 1/2

Processo n.º 904/1310/11323

Pedido n.º --

Visto
Carlos Oliveira Costa
Diretor do CIC

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Cliente / Customer

Designação DE / NCE / UPM / LNEC-EM

(Customer name)

Endereço LNEC

(Address)

Equipamento calibrado / Calibrated equipment

Designação Instrumento de pesagem

(Name) Weighing instrument

Marca e modelo Mettler / PB 8100

(Brand and model)

Dados de identificação 94.04 (EQ17)

(Id. data)

Divisão e alcance 0,1 / 8100 g.

(Division and range)

Equipamento padrão de referência / Reference standards

Designação Pesos padrão

(Name) Standard weights

Marca e classe Kern / E2; Kern / F1.

(Brand and accuracy class)

Dados de identificação 1 mg a 500 g (114.04); 1 kg (116.04); 2 kg (118.04; 120.04); 5 kg (86.04).

(Id. data)

Rastreabilidade Os resultados apresentados no certificado estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o SI.

(Traceability) The results presented are traceable to national or international standards according to SI.

Dados complementares / Complementary data

Data de calibração 2014-10-24 (aaaa-mm-dd)

(Calibration date)

Local de calibração Instalações do cliente, sala 2.

(Testing place)

Customer facilities

Condições ambientais / Environmental conditions

Temperatura / Temperature 22,2 °C a 22,8 °C.

Humidade relativa / Relative humidity 61 % hr a 63 % hr.

Pressão atmosférica / Atmospheric pressure 1 011 mbar a 1 011 mbar.

Procedimento/Norma Proc. UMA(LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.0104.00 (2014)

(Procedure / Norm)

Internal procedure UMA (LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.0104.00 (2014)

Observações / Notes

Inspeção visual e Limpeza efetuada de acordo com instruções do fabricante. Equipamento ligado pelo menos uma hora antes dos ensaios de calibração. Efetuado o nivelamento do recetor de carga. Efetuada regulação do instrumento de pesagem. Bancada não amortecida. Calibração efetuada com o ar condicionado desligado.

Observações gerais

Emissão de 2ª via deste Certificado de Calibração a pedido do cliente.

(Visual inspection and general notes)

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.







LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0158/2015-UMA

Pág. 1/4

Processo n.º 0904/1301/12730

Pedido n.º -

Visto

Carlos Oliveira Costa
Diretor do CIC

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Cliente / Customer

Designação (Customer name)	LNEC / DE / NCE / UPM
Endereço (Address)	Av. do Brasil, 101 1700-066 Lisboa Portugal

Máquina de ensaios de força a calibrar / Calibrated of a force testing machine

signação (Name)	Sistema de medição da força de máquina de ensaios universal (Measuring system of a force universal testing machine)
Marca (Brand)	INSTRON
Modelo (Model)	600LX-B1-C4-J3D
Ano de fabrico (Manufacture year)	-
Número de Série (Serial number)	600LXK4741
Referência (Reference)	UPM/EQ 49
Indicador da força digital / Gama(s) de medição (Force measurement ranges)	60kN 600kN

Equipamentos de referência / Reference standards

Designação (Name)	Transdutores de força (Force Transducers)
Dados de identificação (Id. data)	LMF/EQ 28 (Esc 60 kN) ; LMF/EQ 51 (Esc 600 kN) ;
Traceabilidade dos padrões (Traceability)	HBM - DKD

Dados complementares / Complementary data

Data de calibração (aaaa-mm-dd) (Calibration date) (yyyy-mm-dd)	2015-02-06
Local de calibração (Calibration place)	UPM / NCE / DE / LNEC / LISBOA
Temperatura ambiente máxima (Maximum temperature during calibration)	18,9 °C
Temperatura ambiente mínima (Minimum temperature during calibration)	18,5 °C
Procedimento/Norma (Procedure / Norm)	EN ISO7500-1:2006

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.



167



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0158/2015-UMA

Pág. 2/4

Processo n.º 0904/1301/12730

Pedido n.º -

Visto

Carlos Oliveira Costa
Diretor de C/C

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Resultados das operações de calibração segundo a norma EN ISO7500-1:2006

(Calibration results according EN ISO7500-1:2006)

Gama(s) de medição (Measurement)	Intervalos de medição da escala de força (Measuring force scale intervals)	Classificação (Class)	Valor relativo máximo da incerteza expandida ⁽¹⁾ em cada intervalo de medição (Highest relative expanded uncertainty for each measuring interval)
60 kN	de 6 kN a 60 kN	Classe 0,5	0,29 % da força medida
600 kN	de 60 kN a 600 kN	Classe 0,5	0,43 % da força medida

Observações / Notes

Inspeção visual	Nada a observar	(No comments)
Observações gerais	Nada a observar	(No comments)

Notas:

(1) A incerteza de medição expandida relativa apresentada, é expressa pela incerteza-padrão de medição relativa multiplicada pelo factor de expansão $k=2,05$, o qual, para uma distribuição t de Student com $\nu_{eff}=50$ graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade expandida de, aproximadamente, 95 %. A incerteza de medição foi calculada de acordo com o documento EA-4/02 e Guias da RELACRE n.º 4 e n.º 5.

- As incertezas associadas ao valor da força lida no indicador da força da máquina de ensaios calibrada foram calculadas de acordo com o Guia n.º 12 da RELACRE (Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal).

- A Norma NP 4015-1 recomenda um intervalo de tempo máximo de 12 meses entre duas calibrações consecutivas. Além disso, a máquina de ensaios deve ser sempre submetida a uma nova calibração após a sua mudança para outro local ou após quaisquer reparações ou ajustamentos de que tenha sido objeto.

Notes:

(1) Relative expanded uncertainty is obtained from relative standard uncertainty multiplied by the coverage factor of $k=2,05$, assuming a t-Student distribution with $\nu_{eff}=50$ effective degrees of freedom, corresponding to a probability interval of 95%. The evaluation, is based on EA guide 4/02 and RELACRE guides n.º 4 and n.º 5.

- The measurement uncertainties related with the readings of force testing machines calibrated were obtained according to RELACRE guide n.º 12.

- The NP 4015-1 standard recommends a calibration interval of a 12 months. It also considers that the force testing machine should be calibrated after any change of placement and repairs or maintenance, including change of the parameters.

- The Portuguese Institute of Accreditation (IPAC) is one of the signatories of the International Laboratory Accreditation Co-operation (ILAC) arrangement for the mutual recognition of Calibration Certificates. IPAC is also one of the signatories of the multilateral agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for the mutual recognition of Calibration Certificates issued by accredited laboratories.

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.



DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO
Influência do Método de Ensaio na Determinação da Extensão Total na Força Máxima



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0158/2015-UMA

Pág. 3/4

Processo n.º 0904/1301/12730

Pedido n.º -

Visto  Carlos Ribeiro Costa
Mestre em CEC

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Resultados das operações de calibração da escala de 60 kN em Tracção

(Sistema de medição da força da máquina: Transdutor de força n.º - ; Resolução mínima da máquina de ensaio de força: 0,01 kN)
 (Calibration results of the 60 kN scale. Resolution in tensile mode)

Padrão de força utilizado: Transdutor de força LMF/EQ 28 (Tracção)
 (Reference force transducers)

LMF/EQ 28: 100; Marca: HBM; N.º F 21703; Certificado Calibração: HBM - DKD36212

Resultados obtidos e erros do sistema de medição da força

(Results and errors obtained in the calibration)

Leitura na máquina (Machine reading)	Força lida no padrão de força (kN) (Force transducer reading)						Erros do sistema de medição de força (Calibration errors)				
	Série 1 (Series 1)	Série 2 (Series 2)	Série 3 (Series 3)	Série 3' (Series 3')	Série compl. (Compl. series)	Valores médios (Average values)	q	b	a	q _c	u (%)
	(cres./up)	(cres./up)	(cres./up)	(decre./down)	(Compl. series)		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
kN											
6	5,98	5,99	5,99	-	-	5,99	0,25	0,02	0,17	-	-
12	11,99	12,00	11,99	-	-	12,00	0,04	0,01	0,08	-	-
18	17,99	17,99	17,99	-	-	17,99	0,04	0,02	0,06	-	-
24	23,99	23,99	23,99	-	-	23,99	0,03	0,02	0,04	-	-
30	30,00	30,00	30,00	-	-	30,00	0,00	0,02	0,03	-	-
36	36,01	36,01	36,00	-	-	36,01	-0,02	0,01	0,03	-	-
42	42,01	42,02	42,01	-	-	42,01	-0,04	0,02	0,02	-	-
48	48,03	48,02	48,02	-	-	48,02	-0,05	0,02	0,02	-	-
54	54,03	54,03	54,02	-	-	54,03	-0,05	0,01	0,02	-	-
60	60,04	60,03	60,03	-	-	60,03	-0,05	0,02	0,02	-	-

Classificação de máquina de ensaio nos patamares de força

(Class of the force testing machine at scale intervals)

Força na máquina (Force scale ranges)	Erro de exatidão (Accuracy error)	Erro de repet. (Repeat. error)	Resolução relativa (Relative resolution)	Erro do zero (Zero error)	Erro de rever. (Revers. error)	Erro de exatidão Série compl. (Accuracy error compl.)	Classe de cada patamar (Step class)	Incerteza do patamar (Step Uncertainty)	Incerteza da gama de medição (Step range measurement uncertainty)
kN	q	b	a	f ₀	u	q _c	patamar	U _{pat} (%)	U _{rev} (%)
6	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,29	0,29
12	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
18	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
24	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
30	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
36	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
42	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
48	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
54	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23
60	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,23

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.



16

DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO
Influência do Método de Ensaio na Determinação da Extensão Total na Força Máxima



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0158/2015-UMA

Pág. 4/4

Processo n.º 0904/1301/12730

Pedido n.º

Visto Carlos Oliveira Costa
Diretor de C.T.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Resultados das operações de calibração da escala de 600 kN em Tracção

(Sistema de medição da força da máquina: Transdutor de força n.º -; Resolução mínima da máquina de ensaio de força: 0,01 kN)

Padrão de força utilizado: Transdutor de força LMF/EQ 51 (Tracção)

(Reference force transducers)

LMF/EQ 51: 1000; Marca: HBM; N.º 81740016; Certificado Calibração: HBM - DKD36288

Resultados obtidos e erros do sistema de medição da força

(Results and errors obtained in the calibration)

Leitura na máquina (Machine reading)	Força lida no padrão de força (kN) (Force transducer reading)						Erros do sistema de medição de força (Calibration errors)				
	Série 1 (Series 1)	Série 2 (Series 2)	Série 3 (Series 3)	Série 3' (Series 3')	Série compl. (Complem. series)	Valores médios (Average values)	q	b	a	q _c	u (%)
	(cres./up)	(cres./up)	(cres./up)	(decre./down)	(Complem. series)	Sér. 1 e 2	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
kN											
60	60,01	60,03	60,00	-	-	60,01	-0,02	0,05	0,02	-	-
120	120,04	120,06	120,03	-	-	120,04	-0,04	0,02	0,01	-	-
180	180,03	180,05	180,01	-	-	180,03	-0,02	0,02	0,01	-	-
240	240,00	240,03	239,99	-	-	240,00	0,00	0,02	0,00	-	-
300	299,96	299,99	299,94	-	-	299,96	0,01	0,01	0,00	-	-
360	359,89	359,92	359,87	-	-	359,89	0,03	0,01	0,00	-	-
420	419,75	419,77	419,74	-	-	419,76	0,06	0,01	0,00	-	-
480	479,58	479,60	479,56	-	-	479,58	0,09	0,01	0,00	-	-
540	539,38	539,40	539,36	-	-	539,38	0,11	0,01	0,00	-	-
600	599,21	599,20	599,20	-	-	599,20	0,13	0,00	0,00	-	-

Classificação de máquina de ensaio nos patamares de força

(Class of the force testing machine at scale intervals)

Força na máquina (Force scale ranges)	Erro de exatidão (Accuracy error)	Erro de repet. (Repeat. error)	Resolução relativa (Relative resolution)	Erro do zero (Zero error)	Erro de rever. (Revers. error)	Erro de exatidão Série compl. (Accuracy error compl.)	Classe de cada patamar (Step class)	Incerteza do patamar (Step Uncertainty)	Incerteza da gama de medição (Step range measurement uncertainty)
kN	q	b	a	f ₀	u	q _c	patamar	U _{resv} (%)	U _{resv} (%)
60	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,43	0,43
120	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,29	0,29
180	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,26	0,26
240	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,24	0,24
300	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,24	0,24
360	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,24
420	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,24
480	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,23	0,24
540	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,24	0,24
600	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	Classe 0,5	-	-	Classe 0,5	0,24	0,24

Data de emissão: 2015-03-20

(Issue date:)

Assinaturas / (Signatures)

O Técnico
(The Technician)

Rui Alvarez

Coordenador da UMA
(Head of Applied Metrology Laboratory)

Álvaro S. Ribeiro

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt



Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av. do Brasil 101, 1700-066 LISBOA, PORTUGAL
Tel.: (+ 351) 21 844 30 00; Fax: (+ 351) 21 844 30 41

Centro de Instrumentação Científica
LABORATÓRIO CENTRAL DE APOIO METROLÓGICO

Boletim nº 0642/2014-UMA

Pág. 1/2

Pedido nº 0904/1301/12730

Visto

Carlos Oliveira Costa
Diretor do CIC



Ciente DE / NCE / UPM / LNEC-EM
Endereço LNEC

Instrumento a calibrar

Designação	Transdutor de deslocamento	Nº. inf.	300-8985-1218
Marca e modelo	Instron / M300B		
Alcance (mm)	300,000	Resol. (mm)	0,01

Equipamento de referência

Designação	Interferómetro laser	Nº. inf.	754.01
Marca e modelo	Renishaw / ML-10		
Gama de medição	0,0001 mm a 40 000 mm	Resol. (mm)	0,0001

Rastreabilidade A padrões primários nacionais

Data de calibração 2014-12-16

Procedimento / Norma Procedimento MA/MEC.PRC.3301.00

Condições ambientais

Temperatura: (23 +/- 2) °C e Humidade Relativa: < 70 %

Inspeção visual

Nada a assinalar.

Posicionamento e sentido da calibração

Associado a unidade de leitura EQ49. O braço de referência foi colocado a 160 mm da posição superior.

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Centro de Instrumentação Científica
LABORATÓRIO CENTRAL DE APOIO METROLÓGICO

Boletim nº 0642/2014-UMA

Pág. 2/2

Pedido nº 0904/1301/12730

Visto 
Diretor do CIC

1. Ensaio de verificação da exatidão da escala

Valores referência (mm)	Valores médios lidos (mm)
10,000	10,00
29,991	30,00
60,007	60,00
90,018	90,00
120,015	120,00
150,006	150,00
179,989	180,00
209,976	210,00
239,975	240,00
269,977	270,00
299,979	300,00
---	---
---	---
---	---
---	---
---	---
---	---
---	---
---	---
---	---

2. Repetibilidade

Repet. (mm) = 0,0023

3. Incerteza de medição expandida

$U_{95\%}$ (mm) = 0,008 mm

Lisboa, 2015-01-08

O Operador


(Alexandre Pinheiro)

O Coordenador da UMA/LNEC-EM


(Álvaro S. Ribeiro)

NOTAS:

A incerteza de medição expandida está expressa pela incerteza de medição padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2,00$ calculado segundo uma distribuição t com ≥ 50 graus de liberdade para dar uma probabilidade expandida de 95%.

A incerteza de medição padrão foi calculada de acordo com o documento EA-4/02.

Para o cálculo da incerteza de medição expandida foram consideradas as contribuições das incertezas associadas ao padrão, ao método, às condições de referência e ao objeto de calibração (incluindo a sua resolução e o valor da repetibilidade dos resultados).

A estabilidade a longo prazo do objeto de calibração não foi considerada.



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av. do Brasil 101, 1700-066 LISBOA, PORTUGAL
Tel.: (+ 351) 21 844 30 00; Fax: (+ 351) 21 844 30 41

Centro de Instrumentação Científica
LABORATÓRIO CENTRAL DE APOIO METROLÓGICO

Boletim nº 0643/2014- UMA
Pág. 1/2
Pedido nº 0904/1301/12730

Visto 
Carlos Oliveira Costa
Diretor do CIC



Cliente DE / NCE / UPM / LNEC-EM
Endereço LNEC

Instrumento a calibrar

Designação Extensómetro com indicador dedicado
Marca e modelo EPSILON / 3543 Identificação EQ 50
Comprimento da base 100 mm
Gama de trabalho 0 mm a 50 mm

Equipamento de referência

Designação	Interferómetro laser	Nº. inf.	754.01
Marca e modelo	Renishaw / ML-10		
Gama de medição	0,0001 mm a 40 000 mm	Resolução	0,000001 mm
Designação	Máq. medir 3D	Nº. inf.	203.01
Marca e modelo	DEA / Gamma 22.03		
Gama de medição (x,y,z)	1500 mm x 1000 mm x 1000 mm	Resolução	0,001 mm

Rastreabilidade Aos padrões de refª de VSL, CEM e IPQ ; EAC

Data de calibração 2014-12-17

Procedimento / Norma Procedimento MA/MEC.PRC.3501.00

Condições ambientais

Temperatura: (23 ± 2) °C e Humidade Relativa < 70 % hr

Inspeção visual

Os valores indicados pela cadeia de medição são apresentados com redução de uma casa decimal a partir de 10 mm.

Observações gerais

Associado a unidade de medição EQ-49. Ensaio efetuado apenas no sentido ascendente conforme indicação do cliente.

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Boletim nº 0643/2014- UMA

Pág. 2/2

Pedido nº 0904/1301/12730

Visto Carlos Oliveira Costa
Diretor do LNEC

Centro de Instrumentação Científica
LABORATÓRIO CENTRAL DE APOIO METROLÓGICO

1. Classificação do extensómetro - verificação da exatidão de indicação

Patamar de ensaio (mm)	Valores médios referência (mm)	Valores médios lidos (mm)	Desvio (mm)	Classe
0	0,0000	0,000	0,0000	---
2	1,9962	2,000	0,0038	0,2
4	3,9941	4,000	0,0059	0,2
6	5,9919	6,000	0,0081	0,2
8	8,0008	8,005	0,0042	0,2
10	9,9979	9,995	0,0028	0,2
15	15,001	15,00	0,001	0,2
20	20,001	20,00	0,001	0,2
25	24,997	25,00	0,004	0,2
30	30,000	30,00	0,000	0,2
35	35,000	35,00	0,000	0,2
40	40,004	40,00	0,004	0,2
45	44,999	45,00	0,001	0,2
50	50,001	50,00	0,001	0,2
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---

2. Repetibilidade

Repet. (mm) = 0,0040

3. Ensaio de verificação do valor do comprimento da base do extensómetro

Valor nominal	Valor determinado	Erro	Classe
100 mm	99,867 mm	0,13 %	0,2

4. Incerteza de medição expandida

$U_{95\%} = 16 \mu\text{m}$ (para o ensaio nº. 1 e ensaio nº. 2)

$U_{95\%} = 4,0 \mu\text{m}$ (para o ensaio nº. 3)

Lisboa, 2015-01-09

O Operador

Alexandre Pinheiro
(Alexandre Pinheiro)

O Coordenador da UMA/LNEC-EM

Álvaro S. Ribeiro
(Álvaro S. Ribeiro)

NOTAS:

A incerteza de medição expandida está expressa pela incerteza de medição padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2,05$ calculado segundo uma distribuição t com 50 graus de liberdade para dar uma probabilidade expandida de 95%.

A incerteza de medição padrão foi calculada de acordo com o documento EA-4/02.

Para o cálculo da incerteza de medição expandida foram consideradas as contribuições das incertezas associadas ao padrão, ao método, às condições de referência e ao objeto de calibração (incluindo a sua resolução e o valor da repetibilidade dos resultados).

A estabilidade a longo prazo do objeto de calibração não foi considerada.

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0134/2015-UMA

Pág. 1/2

Processo n.º 0904/1301/03547

Pedido n.º ---

Visto
Carlos Oliveira Costa
Diretor do LNEC

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Ciente / Customer

Designação DE / NCE / UPM / LNEC-EM

(Customer name)

Endereço

LNEC - Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

(Address)

Equipamento calibrado / Calibrated equipment

Designação Paquímetro digital

(Name)

Vernier calliper

Marca e modelo

Mitutoyo / CD-15DC

(Brand and model)

Dados de identificação

EQ15 / 523.01

(Id. data)

Resolução / Alcance

0,01 mm ; 150 mm

(Resolution / Nominal range)

Equipamento padrão de referência / Reference standards

Designação Calibrador de paquímetros

(Name)

Calliper standard scale

Dados de identificação

683.01

(Id. data)

Rastreabilidade

Os resultados apresentados no certificado estão rastreados a padrões nacionais ou internacionais que realizam as unidades de medição de acordo com o SI.

(Traceability)

The results presented are traceable to national or international standards according to SI.

Dados complementares / Complementary data

Data de calibração 2015-03-19

(Calibration date)

(aaaa-mm-dd)

(yyyy-mm-dd)

Local de calibração

Instalações da Unidade de Metrologia Aplicada do LNEC-EM

(Testing place)

LNEC-EM Applied Metrology Laboratory Unit facilities

Condições ambientais

Temperatura: (20 +/- 1) °C e Humidade relativa ≤ 65 % hr

(Environmental conditions)

Temperature: (20 +/- 1) °C and Relative humidity ≤ 65 % hr

Procedimento/Norma

Proc. UMA(LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.0901.00 (2014)

(Procedure / Norm)

Internal procedure UMA (LNEC-EM) Id. MA/MEC.PRC.0901.00 (2014)

Observações / Notes

Inspeção visual Nada a assinalar.

(Visual inspection)

Nothing to report.

Observações gerais

Nada a assinalar.

(General remarks)

Nothing to report.

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metrológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.

LNEC-2041



17



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

UMA - Unidade de Metrologia Aplicada

Certificado n.º 0134/2015-UMA

Pág. 2/2

Processo n.º 0904/1301/03547

Pedido n.º --

Visto Carlos Oliveira Costa
Diretor da CII

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Resultados / Results

Valores de referência (Reference values) mm	Valores lidos (Readings) mm	Incerteza expandida de medição * (Expanded uncertainty of measurement) ($U_{95\%}$) / mm
Medições exteriores (outside measurements)		
20,000	19,99	0,019
50,000	49,99	0,019
100,000	99,99	0,019
150,001	150,00	0,019
---	---	---
---	---	---
---	---	---
---	---	---
---	---	---
Medições interiores (inside measurements)		
---	---	---
---	---	---
99,999	100,00	0,019
---	---	---
---	---	---
---	---	---
---	---	---
---	---	---

* Os valores indicados representam a semi-amplitude do intervalo de incerteza expandida de medição (conforme definido no ISO-GUM)

* The values shown represent the half-width of the measurement expanded uncertainty interval (as defined in ISO-GUM)

Erro de paralelismo (Parallelism error)	0,010 mm	Largura dos traços (Markers width) ---
Repetibilidade (Repeatability)	0,005 mm	

Data de emissão: Lisboa, 25 de março de 2015
(Date of issue)

Assinaturas / Signatures

O Técnico
(The Technician)

(João A. Fernandes)

O Coordenador da UMA/LNEC-EM
(Head of the Applied Metrology Laboratory)

(Álvaro S. Ribeiro)

Notas:

The Portuguese Institute of Accreditation (IPAC) is one of the signatories of the International Laboratory Accreditation Co-operation (ILAC) arrangement for the mutual recognition of Calibration Certificates. IPAC is also one of the signatories of the multilateral agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for the mutual recognition of Calibration Certificates issued by accredited laboratories.

A incerteza expandida de medição, calculada de acordo com o documento EA-4/02, está expressa pela incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k=2,02$ calculado segundo uma distribuição t com 130 graus de liberdade para dar uma probabilidade expandida de 95%.)

The expanded uncertainty of measurement, evaluated according with the guide EA-4/02, is expressed by the product of the standard uncertainty by the expansion factor $k=2,02$ evaluated using a t -Student distribution with 130 degrees of freedom, in order to achieve an expanded probability of 95%.)

LNEC CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA Núcleo de Qualidade Metroológica

Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax: (+351) 21 844 30 20 • lnecc@lnecc.pt www.lnecc.pt

Não é permitida a divulgação parcial dos resultados constantes deste Boletim na qual se faça referência ao LNEC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores dos equipamentos ou padrões calibrados são simples transcrição de informações recebidas ou de anotações apostas enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do LNEC. Os resultados só são válidos para os itens calibrados.

LNEC-2041



ANEXO B



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC-EM Ensaios e Metrologia

Procedimento de ensaio – V.00

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

ÍNDICE

- 1. ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA**
- 2. PRINCÍPIOS DE ENSAIO**
- 3. ENSAIO DE TRAÇÃO**
- 4. PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA**
 - 4.1 - Determinação através do diagrama tensão-extensão
 - 4.2 - Determinação através da medição da deformação do provete após rotura
- 5. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA**

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

1 - ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA

A Unidade de Produtos Metálicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (UPM/LNEC) efetua a determinação da extensão total na força máxima de provetes de materiais metálicos submetidos a ensaios de tração, segundo o método de ensaio que consta na norma ISO 6892-1 [1], para avaliação da conformidade dos provetes de materiais metálicos face ao exigido para o material em causa.

Este documento descreve os princípios, os métodos e os procedimentos necessários à realização do ensaio de tração em causa e assegurar a sua adequação à utilização pretendida com vista a assegurar a determinação da extensão total na força máxima.

Para realizar o ensaio referido, a UPM/LNEC dispõe do seguinte equipamento de referência:

- Equipamento de marcações equidistantes ao longo da zona útil do provete, rastreado a padrões dimensionais primários;
- Sistema de medição da máquina de ensaios de força, rastreado a padrões primários de força;
- Extensómetro, rastreado a padrões dimensionais primários;
- Craveira digital, rastreado a padrões dimensionais primários.

2- PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO

O princípio de medição da extensão total na força máxima num provete metálico submetido a um ensaio de tração consiste na determinação do acréscimo do comprimento entre referências do provete na força máxima, expresso em percentagem do comprimento inicial entre referências (L_0). Distingue-se a extensão total na força máxima A_{gt} (Figura 1) e a extensão permanente na força máxima A_g (Figura 1).

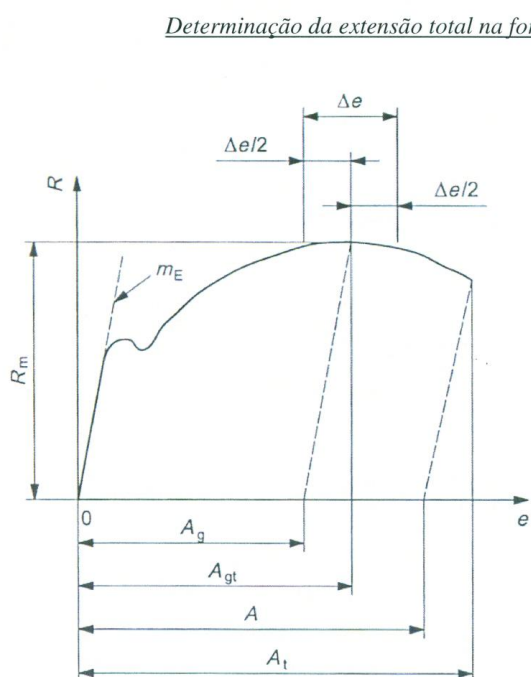


Figura 1 – Diagrama de tensão-extensão.

3 - ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração para caracterização de produtos metálicos são realizados de acordo com os requisitos da norma ISO 6892-1 [1].

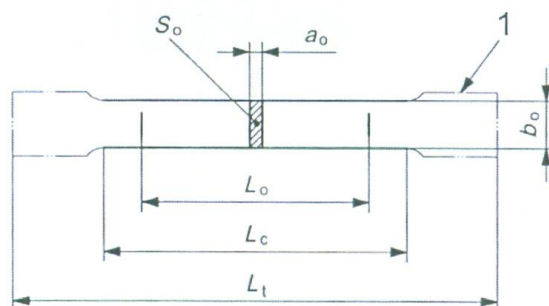
Os ensaios devem ser efetuados à temperatura ambiente entre 10°C e 35°C, na ausência de outra especificação em contrário. Os ensaios efetuados na UPM estão sob condições controladas sendo realizados a uma temperatura de 23°C \pm 5°C.

O sistema de medição de máquina de ensaios de força deve encontrar-se calibrado de acordo com a norma NP EN ISO 7500-1 [2] e deve ser pelo menos de classe 1. Quando se utiliza um extensómetro, este deve encontrar-se calibrado de acordo com a norma EN ISO 9513 [3] e deve ser pelo menos da classe 1 para se determinar a tensão limite convencional de proporcionalidade. Na determinação de outras propriedades (envolvendo a medição de alongamento mais elevados, como a extensão total na força máxima) pode ser utilizado um extensómetro de classe 2.

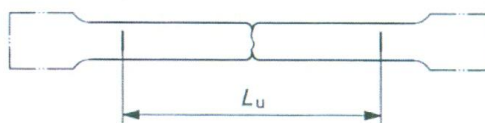
Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

O provete deve ser fixado através de sistemas de amarração adequados, tais como garras em cunha, suportes roscados, suportes com ressalto ou garras hidráulicas, de modo a não causar danos à superfície do provete. Devem ser desenvolvidos esforços para garantir que os provetes sejam amarrados de modo a que a força seja aplicada o mais axialmente possível. Esta condição é especialmente importante no caso de ensaios de materiais frágeis (armadura de pré-esforço, por ex.) ou quando se pretende determinar a tensão limite convencional de proporcionalidade, a tensão limite convencional da extensão total ou a tensão de cedência. Se a rotura ocorrer numa amarração ou a uma distância das amarrações inferior a 20 mm ou ao diâmetro do provete d , no caso de varões, ou inferior a $2d$ no caso dos fios, o ensaio pode ser considerado inválido se o resultado não for satisfatório.

O comprimento livre entre as garras da máquina deve ser tal que permita aferir a extensão total na força máxima para qualquer um dos métodos previstos na norma de referência. O comprimento da zona útil (L_c) deve ser sempre superior ao comprimento inicial entre referências (L_0).



a) Before testing



b) After testing

Figura 2 – Provetes maquinado

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

As extremidades do comprimento inicial entre referências são gravadas através de pequenas marcas ou de traços de ponta seca, não sendo admissíveis marcas que formem entalhes que possam dar origem a roturas prematuras.

No que respeita à velocidade do ensaio, esta varia de acordo com os limites especificados na norma ISO 6892-1 [1]. Para se determinar a tensão de cedência superior, a velocidade de afastamento das cabeças de amarração deve ser o mais constante possível e devendo estar compreendida entre os valores limites de aplicação da tensão indicados no Quadro 1.

Para se determinar a tensão limite convencional de proporcionalidade, a velocidade de aplicação da força também deverá encontrar-se dentro dos limites fixados no Quadro 1.

No domínio elástico, até a tensão limite convencional de proporcionalidade ou a tensão limite convencional de extensão total ser atingida, a velocidade de ensaio não deve conduzir a uma variação de extensão superior a $0,0025 \text{ s}^{-1}$.

Depois da determinação das tensões de cedência ou limite convencional de proporcionalidade, a velocidade de ensaio pode ser aumentada até uma velocidade de deformação máxima correspondente a uma variação de extensão de $0,008 \text{ s}^{-1}$.

Quadro 1 – Limites de velocidade de aplicação da tensão

Módulo de elasticidade do material (E) MPa	Velocidade de aplicação da força MPa.s ⁻¹	
	min.	máx.
< 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

4 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA

A determinação da extensão total na força máxima A_{gt} , pode ser efetuada através de um dos seguintes métodos:

- Determinação através do diagrama tensão-extensão;
- Determinação através da medição da deformação do provete após rotura.

4.1 - Determinação através do diagrama tensão-extensão

Este método consiste no registo do diagrama tensão-extensão ao longo de todo o ensaio, e na posterior leitura, neste diagrama, da deformação correspondente à força máxima.

O registo do diagrama tensão-extensão pode ser efetuado analogicamente ou através de um sistema de aquisição de dados, com posterior tratamento, através de um software de cálculo, da informação recolhida.

Ao recorrer a um extensómetro (manual ou automático) para o cálculo da extensão total na força máxima, este deve possuir um comprimento de base de pelo menos 100 mm para varões de aço para betão armado. A extensão total na força máxima corresponde ao valor da extensão registada quando se regista a força máxima de ensaio.

Em face dos objetivos do estudo a desenvolver considera-se necessário prever a utilização de dois extensómetros em paralelo, com vista a avaliar a deformação dos provetes ao nível de deformação em regime elástoplástico.

Os referidos extensómetros devem ser colocados de acordo com o definido na Figura 3.

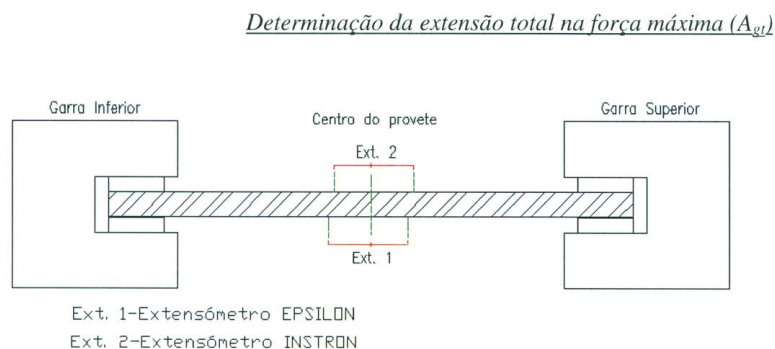


Figura 3 - Representação esquemática da localização dos extensômetros.

4.2 - Determinação através da medição da deformação do provete após rotura

A norma ISO 6892-1 [1] faz referência, no seu anexo I, à possibilidade de se determinar a extensão total na força máxima através de um método manual. O método consiste em medir, na parte mais longa do provete fraturado num ensaio de tração, a extensão permanente na força de rotura à tração, a partir da qual é calculada a extensão total na força máxima.

Antes do ensaio, efetuam-se marcações equidistantes ao longo da zona útil do provete, devendo a distância entre duas marcas consecutivas ser igual a um submúltiplo do comprimento inicial entre referências (L'_0). A marcação dos comprimentos entre referências deverá ser feita com uma precisão de $\pm 0,5$ mm. O comprimento entre referências (L'_0) é função do valor da extensão total. No caso de varões para betão armado deve ser igual a 100 mm.

A medição do comprimento final após rotura (L'_u) é feita na parte mais longa do provete fraturado e deverá ser feita com uma precisão de $\pm 0,5$ mm.

Para que a medição seja válida, é necessário que os limites da zona de medição se encontrem localizados a uma distância de pelo menos 50 mm ou $2d$ da secção de rotura, e a uma distância de pelo menos 20 mm ou d da garra mais próxima.

A extensão permanente na força máxima, A_g , expressa em percentagem, é calculada pela seguinte expressão:

$$A_g = \frac{L'_u - L'_0}{L'_0} \times 100$$

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

em que:

A_g representa a extensão permanente na força máxima;

L'_u representa o comprimento final entre referências para a determinação do A_g ;

L'_0 representa o comprimento inicial entre referências para a determinação do A_g .

A extensão total na força máxima, expressa em percentagem, é calculada pela seguinte expressão:

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{E} \times 100$$

em que:

A_{gt} representa a extensão total na força máxima;

R_m representa a tensão máxima registada no decorrer do ensaio, em MPa;

E , representa o módulo de elasticidade do material: 200 GPa no caso de varões para betão armado, 205 GPa no caso de fios de aço para pré-esforço e 195 GPa no caso de cordões de aço para pré-esforço.

Por forma a se poder determinar a extensão total na força máxima com a maior exatidão possível, a medição será efetuada sempre que possível em quatro zonas distintas ao longo do provete ensaiado conforme ilustrado na Figura 4.

Consideram-se então duas zonas junto a cada uma das garras da máquina de ensaio (L1G e L2G) e outras duas zonas junto à zona de rotura (L1R e L2R). Em qualquer caso devem assegurar-se os afastamentos à zona de amarração e à zona de rotura prevista na norma.

Esta medição tem como principal objetivo apoiar a análise do comportamento dos provetes ao nível da deformação em regime elásto-plástico.

Determinação da extensão total na força máxima (A_{gt})

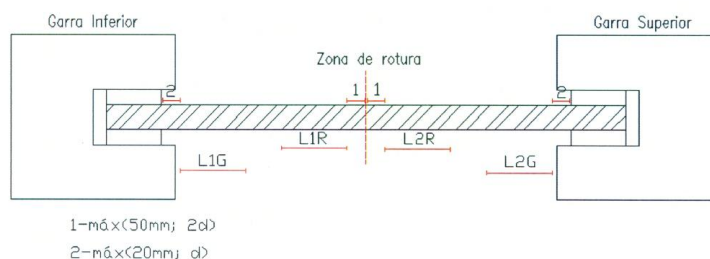


Figura 4 – Representação esquemática das zonas sujeita a medição do comprimento.

5 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- [1] ISO 6892-1: “Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature”, International Organization for Standardization, 2009.
- [2] NP EN ISO 7500-1: “Materiais metálicos. Verificação de máquinas de ensaios estáticos uniaxiais – Parte 1: Máquinas de ensaio de tracção/compressão. Verificação e calibração do sistema de medição da força”, IPQ, 2006.
- [3] EN ISO 9513: “Metallic materials. Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing”, International Organization for Standardization, 2012.
- [4] ISO 15630-1: “Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire”, International Organization for Standardization, 2010.
- [5] ISO 15630-2: “Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 2: Welded fabric”, International Organization for Standardization, 2010.
- [6] ISO 15630-3: “Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 3: Prestressing steel”, International Organization for Standardization, 2010.

ANEXO C

Grandeza	Estimativa	Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	FdP	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	GDL
F	33,30 kN	$u(F)$	Força máxima Calibração da máquina Resolução	B B	Normal Retangular	0,07 kN	0,0199 mm-2	1,4 MPa	50
						0,07 kN	1	0,07 kN	50
						0,0029 kN	1	0,0029 kN	50
S_o	50,3 mm ²	$u(S_o)$	Área do provete Diferença entre área efetiva e nominal	B	Retangular	0,3 mm ²	-0,0132 kN mm-4	4,6 MPa	50
						0,3 mm ²	1	0,3 mm ²	50

Grandeza: R_m
 Estimativa: 662,0 MPa
 Incerteza padrão combinada: 4,8 MPa
 Graus de liberdade efetivos: 59

Grandeza	Estimativa	Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	FdP	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	GDL
$L u'$	108,600 mm	$u(L u')$	Comprimento final Calibração do paquímetro Resolução Repetibilidade instrumental	B B N	Normal Retangular Normal	0,011 mm	1 %mm-1	0,011 %	65
						0,0095 mm	1	0,0095 mm	50
						0,0029 mm	1	0,0029 mm	50
$L 0'$	100,00 mm	$u(L 0')$	Comprimento inicial Tolerância de marcação do provete	B	Retangular	0,0050 mm	1	0,0050 mm	9
						0,29 mm	-1,09 %mm-1	0,31 %	50
						0,29 mm	1	0,29 mm	50

Grandeza: A_g
 Estimativa: 8,60 %
 Incerteza padrão combinada: 0,31 %
 Graus de liberdade efetivos: 50

DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO
Influência do Método de Ensaio na Determinação da Extensão Total na Força Máxima

Medição manual

Grandeza	Estimativa	Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	FdP	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	GDL
Ag	8,60 %	u(Ag)				0,31 %	1	0,31 %	50
Rm	662,0 MPa	u(Rm)				4,8 MPa	0,0005 %MPa-1	0,0024 %	52
E	200,00 GPa	u(E)				2,89 GPa	-0,0002 %GPa-1	0,0005 %	50

Grandeza: Agt
Estimativa: 8,93 %
Incerteza padrão combinada: 0,31 %
Graus de liberdade efetivos: 50
Fator de expansão: 2,01
Incerteza expandida (95%): 0,63 %

Medição automática com extensômetro EPSILON

Grandeza	Estimativa	Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	FdP	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	GDL
Lu'	107,900 mm	u(Lu')	Comprimento final			0,010 mm	1,00 %mm-1	0,010 %	99
			Calibração do extensômetro	B	Normal	0,008 mm	1	0,008 mm	50
			Resolução	B	Retangular	0,003 mm	1	0,003 mm	50
			Desvios sistemáticos	B	Retangular	0,005 mm	1	0,005 mm	50
			Repetibilidade instrumental	A	Normal	0,004 mm	1	0,004 mm	9
L0'	100,000 mm	u(L0')	Comprimento inicial			0,038 mm	-1,08 %mm-1	0,041 %	50
			Diferença entre valor nominal e efetivo	B	Retangular	0,038 mm	1	0,038 mm	50

Grandeza: Agt
Estimativa: 7,90 %
Incerteza padrão combinada: 0,04 %
Graus de liberdade efetivos: 56
Fator de expansão: 2,00
Incerteza expandida (95%): 0,09 %

Medição automática com extensômetro INSTRON

Grandeza	Estimativa	Componente de incerteza	Fontes de incerteza	Tipo de incerteza	FdP	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza combinada	GDL
Lu'	107,900 mm	u(Lu')	Comprimento final			0,013 mm	1 %mm-1	0,013 %	72
			Calibração do transdutor	B	Normal	0,004 mm	1	0,004 mm	50
			Resolução	B	Retangular	0,003 mm	1	0,003 mm	50
			Desvios sistemáticos	B	Retangular	0,012 mm	1	0,012 mm	50
			Repetibilidade instrumental	A	Normal	0,0023 mm	1	0,002 mm	9
L0'	100,000 mm	u(L0')	Comprimento inicial			0,018 mm	-1,08 %mm-1	0,020 %	50
			Posicionamento do braço	B	Retangular	0,018 mm	1	0,018 mm	50

Grandeza: Agt
Estimativa: 7,90 %
Incerteza padrão combinada: 0,02 %
Graus de liberdade efetivos: 89
Fator de expansão: 1,99
Incerteza expandida (95%): 0,05 %

ANEXO D

A500 ER



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ.50) (%)
Rotura válida	6,0	28,1	18,0	18,9	636	666	100	4,33	4,3	4,7	4,6	4,3
Rotura válida	6,0	28,0	18,1	18,9	639	669	100	4,36	4,4	4,7	4,6	4,5
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	6,0	28,1	18,3	19,1	648	674	100	4,38	4,4	4,7	3,4	3,6
Rotura válida	6,0	28,1	18,0	18,8	635	664	100	3,02	3,0	3,4	3,2	3,0
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	6,0	28,1	18,3	19,2	646	677	100	5,09	5,1	5,4	4,3	4,1
Rotura válida	6,0	28,1	18,1	19,2	640	677	100	4,73	4,7	5,1	5,0	5,1
Rotura válida	6,0	28,1	17,5	18,7	617	661	100	5,83	5,8	6,2	5,4	5,4
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	6,0	28,2	18,4	19,3	652	681	100	5,24	5,2	5,6	4,5	4,4
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	6,0	28,1	18,4	19,3	651	681	100	4,49	4,5	4,8	4,5	4,4
Rotura válida	6,0	28,2	18,2	19,1	644	673	100	4,23	4,2	4,6	4,0	4,0
Média	6,0	28,1	18,1	19,0	641	672	100	4,57	4,6	4,9	4,4	4,3
Desvio Padrão	0,0	0,0	0,3	0,2	10	7	0	0,74	0,7	0,7	0,7	0,7
Rotura válida	5,9	27,6	15,5	18,0	546	636	100	3,42	3,4	3,7	3,2	3,4
Rotura válida	5,9	27,6	16,9	18,2	598	644	100	3,06	3,1	3,4	2,7	2,9
Rotura válida	5,9	27,6	16,9	18,2	599	641	100	4,95	5,0	5,3	5,2	4,1
Rotura válida	5,9	27,6	17,1	18,6	604	658	100	2,99	3,0	3,3	3,7	2,9
Rotura válida	5,9	27,7	15,7	19,0	553	670	100	3,51	3,5	3,8	4,3	3,5
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	5,9	27,7	17,8	18,6	629	657	100	4,11	4,1	4,4	3,1	3,5
Rotura válida	5,9	27,7	16,7	18,6	591	657	100	3,34	3,3	3,7	3,8	4,3
Rotura válida	5,9	27,7	17,2	18,8	609	663	100	3,48	3,5	3,8	4,1	3,6
Rotura válida	5,9	27,7	17,0	18,6	600	657	100	4,30	4,3	4,6	4,5	4,0
Rotura válida	5,9	27,8	17,5	18,8	617	663	100	3,88	3,9	4,2	3,6	4,3
Média	5,9	27,7	16,8	18,5	595	654	100	3,70	3,7	4,0	3,8	3,7
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,7	0,3	26	11	0	0,61	0,6	0,6	0,7	0,5

A400 NR



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	11,9	111	49,6	63,4	439	561	100	16,92	16,9	17,2	15,7	15,8
Rotura válida	11,9	112	50,6	63,7	448	564	100	16,99	17,0	17,3	15,8	15,5
Rotura válida	11,9	111	50,2	63,4	445	561	100	19,44	19,4	19,7	16,1	16,2
Rotura válida	11,9	112	50,3	63,7	445	564	100	19,05	19,1	19,3	15,6	16,0
Rotura válida	11,9	111	50,7	63,6	448	563	100	16,41	16,4	16,7	14,6	14,7
Rotura válida	11,9	112	50,7	63,6	449	563	100	17,36	17,4	17,6	16,1	16,4
Rotura válida	11,9	111	50,4	63,5	446	562	100	16,08	16,1	16,4	16,9	16,8
Rotura válida	11,9	111	50,1	63,5	444	562	100	17,32	17,3	17,6	16,2	16,0
Rotura válida	11,9	111	50,6	63,5	448	562	100	15,11	15,1	15,4	16,9	16,5
Rotura válida	11,9	112	50,6	63,7	448	563	100	17,81	17,8	18,1	15,2	15,2
Média	11,9	112	50,4	63,6	446	563	100	17,25	17,2	17,5	15,9	15,9
Desvio Padrão	0,0	0	0,3	0,1	3	1	0	1,30	1,3	1,3	0,7	0,6
Rotura válida	11,9	112	50,1	64,0	443	566	100	11,09	11,1	11,4	11,6	12,5
Rotura válida	11,9	112	50,6	64,4	447	570	100	13,72	13,7	14,0	12,9	14,8
Rotura válida	11,9	112	50,0	63,6	443	563	100	15,18	15,2	15,5	14,5	13,9
Rotura válida	11,9	112	50,6	64,1	448	567	100	11,92	11,9	12,2	11,4	14,6
Rotura válida	12,0	112	51,0	64,4	452	570	100	15,75	15,8	16,0	14,3	14,5
Rotura válida	11,9	112	48,7	63,0	431	558	100	16,33	16,3	16,6	15,6	16,2
Rotura válida	11,9	112	50,5	63,8	447	565	100	12,32	12,3	12,6	15,2	12,5
Rotura válida	11,9	112	49,1	63,7	435	564	100	15,62	15,6	15,9	14,5	17,5
Rotura válida	12,0	112	49,9	63,4	441	561	100	15,15	15,2	15,4	13,9	17,7
Rotura válida	11,9	112	49,5	63,3	438	560	100	12,53	12,5	12,8	13,7	12,6
Média	11,9	112	50,0	63,8	443	564	100	13,96	14,0	14,2	13,8	14,7
Desvio Padrão	0,0	0	0,7	0,4	6	4	0	1,88	1,9	1,9	1,4	1,9

A400 NR



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	16,0	201	90,9	112	452	558	100	16,47	16,5	16,7	14,0	13,5
Rotura válida	16,0	201	92,9	113	462	563	100	17,39	17,4	17,7	13,5	13,4
Rotura válida	15,8	196	88,1	110	438	547	100	20,25	20,3	20,5	13,9	13,9
Rotura válida	15,9	199	91,4	112	455	555	100	15,31	15,3	15,6	13,4	13,1
Rotura válida	15,9	199	90,1	111	448	555	100	16,99	17,0	17,3	13,6	14,2
Rotura válida	16,0	200	90,4	112	450	558	100	14,28	14,3	14,6	13,1	13,3
Rotura válida	15,9	200	89,9	112	447	557	100	15,30	15,3	15,6	14,2	13,8
Rotura válida	15,9	200	90,7	112	451	557	100	13,94	13,9	14,2	13,1	12,9
Rotura válida	16,0	200	90,7	112	451	559	100	17,60	17,6	17,9	13,8	13,6
Rotura válida	16,0	201	93,1	114	463	565	100	18,79	18,8	19,1	13,5	14,2
Média	15,9	200	90,8	112	452	557	100	16,63	16,6	16,9	13,6	13,6
Desvio Padrão	0,1	1	1,4	1	7	5	0	1,99	2,0	2,0	0,4	0,4
Rotura válida	16,1	204	87,8	100	437	498	100	19,47	19,5	19,7	-	-
Rotura válida	15,9	199	97,3	110	484	548	100	13,84	13,8	14,1	13,6	13,9
Rotura válida	15,9	199	96,3	109	479	542	100	14,72	14,7	15,0	12,7	13,0
Rotura válida	15,9	199	101	113	500	564	100	14,94	14,9	15,2	12,4	12,2
Rotura válida	15,9	199	96,8	109	482	545	100	13,05	13,1	13,3	11,7	11,7
Rotura válida	15,9	197	96,7	109	481	543	100	16,57	16,6	16,8	13,3	13,3
Rotura válida	15,8	197	96,4	109	480	543	100	14,05	14,1	14,3	13,1	13,2
Rotura válida	15,9	198	96,2	109	479	542	100	14,65	14,7	14,9	12,1	12,0
Rotura válida	15,9	199	96,2	109	479	540	100	16,81	16,8	17,1	13,4	12,9
Rotura válida	15,9	198	97,2	110	483	546	100	16,03	16,0	16,3	12,1	11,8
Média	15,9	199	96,2	109	478	541	100	15,41	15,4	15,7	12,7	12,7
Desvio Padrão	0,1	2	3,2	3	16	17	0	1,87	1,9	1,9	0,7	0,8

A500 NR



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L ₀ (mm)	L _u -L ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M 300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	8,0	49,8	29,5	32,7	585	651	100	6,60	6,6	6,9	8,4	8,7
Rotura válida	8,0	49,7	29,0	32,4	576	645	100	5,75	5,8	6,1	7,0	6,5
Rotura válida	8,0	49,9	29,0	32,6	577	647	100	6,65	6,7	7,0	7,1	7,5
Rotura válida	8,0	49,7	29,2	32,4	580	644	100	7,24	7,2	7,6	7,4	7,7
Rotura válida	8,0	50,0	29,8	33,4	592	663	100	9,15	9,2	9,5	9,0	9,1
Rotura válida	8,0	49,8	29,6	33,2	588	660	100	9,75	9,8	10,1	8,8	8,7
Rotura válida	8,0	49,6	30,3	33,5	602	665	100	10,09	10,1	10,4	9,9	10,4
Rotura válida	8,0	49,7	30,2	33,5	601	665	100	9,27	9,3	9,6	9,0	9,5
Rotura válida	7,9	49,6	28,8	32,2	573	640	100	8,89	8,9	9,2	9,0	8,8
Rotura válida	8,0	49,8	30,2	33,6	600	667	100	8,78	8,8	9,1	8,6	8,1
Média	8,0	49,8	29,5	32,9	587	655	100	8,22	8,2	8,5	8,4	8,5
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,6	0,5	11	10	0	1,52	1,5	1,5	1,0	1,1
Rotura válida	7,9	49,3	28,0	32,4	557	645	100	9,59	9,6	9,9	9,3	9,4
Rotura válida	7,9	49,6	28,1	32,9	559	653	100	10,94	10,9	11,3	11,5	11,6
Rotura válida	7,9	49,6	27,9	32,4	554	644	100	10,92	10,9	11,2	11,0	10,5
Rotura válida	7,9	49,3	27,6	32,1	549	639	100	9,04	9,0	9,4	11,7	12,5
Rotura válida	7,9	49,6	28,4	32,8	565	651	100	9,03	9,0	9,4	8,2	8,1
Rotura válida	7,9	48,8	27,7	31,8	550	632	100	8,63	8,6	8,9	8,9	8,8
Rotura válida	7,9	49,3	28,5	32,9	566	653	100	9,82	9,8	10,1	9,6	9,0
Rotura válida	8,0	49,8	28,3	33,2	563	660	100	11,13	11,1	11,5	10,0	9,2
Rotura válida	8,0	49,9	28,7	33,4	570	664	100	10,25	10,3	10,6	9,9	9,9
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	7,9	49,4	28,0	32,4	557	644	100	8,72	8,7	9,0	9,2	9,1
Média	7,9	49,4	28,1	32,6	559	649	100	9,81	9,8	10,1	9,9	9,8
Desvio Padrão	0,0	0,3	0,3	0,5	7	10	0	0,96	1,0	1,0	1,1	1,4

A500 NR



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	11,9	111	63,8	73,1	564	647	100	7,11	7,1	7,4	9,5	9,0
Rotura válida	12,0	112	62,9	73,0	557	646	100	9,82	9,8	10,1	11,3	9,3
Rotura válida	11,9	111	62,4	72,1	552	638	100	8,55	8,6	8,9	10,6	8,3
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	12,0	112	62,6	73,2	554	648	100	10,43	10,4	10,8	8,7	10,1
Rotura válida	11,9	111	63,3	72,7	560	643	100	8,34	8,3	8,7	8,8	9,4
Rotura válida	11,9	111	63,3	73,2	560	647	100	10,01	10,0	10,3	9,6	10,8
Rotura válida	11,9	112	61,0	71,7	539	634	100	8,65	8,7	9,0	10,2	9,3
Rotura válida	11,9	111	62,5	72,4	553	641	100	8,47	8,5	8,8	9,2	8,7
Rotura válida	11,9	112	61,9	71,9	548	636	100	7,53	7,5	7,8	10,7	7,8
Rotura válida	11,9	112	62,9	72,6	556	642	100	7,60	7,6	7,9	7,8	8,5
Média	11,9	112	62,6	72,6	554	642	100	8,65	8,7	9,0	9,6	9,1
Desvio Padrão	0,0	0	0,8	0,5	7	5	0	1,12	1,1	1,1	1,1	0,9

A500 NR



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	24,8	481	274	325	557	663	100	8,82	8,8	9,2	8,5	8,1
Rotura válida	24,7	478	272	325	555	661	100	9,65	9,7	10,0	9,4	9,2
Rotura válida	24,7	478	275	325	560	662	100	8,62	8,6	9,0	10,0	9,7
Rotura válida	24,7	478	269	322	549	656	100	10,43	10,4	10,8	9,3	9,0
Rotura válida	24,7	479	273	325	556	662	100	7,98	8,0	8,3	8,9	9,5
Rotura válida	24,7	479	273	324	556	660	100	8,71	8,7	9,0	8,2	8,1
Rotura válida	24,5	471	274	323	558	658	100	8,61	8,6	8,9	9,8	10,0
Rotura válida	24,8	483	276	327	562	666	100	8,25	8,3	8,6	8,1	9,2
Rotura válida	24,7	479	270	323	551	657	100	9,91	9,9	10,2	9,4	9,5
Rotura válida	24,7	479	278	328	566	667	100	7,56	7,6	7,9	7,6	7,2
Média	24,7	478	273	325	557	661	100	8,85	8,9	9,2	8,9	9,0
Desvio Padrão	0,1	3	2	2	5	4	0	0,89	0,9	0,9	0,8	0,9

A400 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	10,0	79,3	35,3	45,5	450	579	100	17,52	17,5	17,8	14,5	15,8
Rotura válida	10,0	79,0	34,9	45,2	445	576	100	16,46	16,5	16,7	14,2	15,2
Rotura válida	10,0	78,2	34,6	44,5	441	567	100	20,01	20,0	20,3	15,0	15,0
Rotura válida	10,1	80,0	35,2	45,5	448	580	100	16,07	16,1	16,4	14,4	15,1
Rotura válida	10,0	78,2	34,3	44,6	437	569	100	14,22	14,2	14,5	15,1	18,0
Rotura válida	10,0	78,5	34,8	44,8	444	570	100	14,06	14,1	14,3	15,3	16,8
Rotura válida	10,0	79,3	34,5	45,0	439	573	100	16,53	16,5	16,8	14,5	17,8
Rotura válida	10,0	78,6	34,6	44,7	441	570	100	17,00	17,0	17,3	15,7	17,3
Rotura válida	10,1	79,8	34,8	45,4	444	579	100	17,29	17,3	17,6	15,1	16,0
Rotura válida	10,0	79,3	34,6	45,1	441	574	100	16,24	16,2	16,5	14,6	15,1
Média	10,0	79,0	34,8	45,0	443	574	100	16,54	16,5	16,8	14,8	16,2
Desvio Padrão	0,0	0,6	0,3	0,4	4	5	0	1,69	1,7	1,7	0,5	1,2
Rotura válida	10,0	79,0	34,6	44,0	440	560	100	16,59	16,6	16,9	14,6	15,1
Rotura válida	9,9	77,7	34,7	43,9	442	559	100	16,04	16,0	16,3	14,4	14,5
Rotura válida	9,9	77,0	35,7	44,5	455	567	100	16,52	16,5	16,8	13,6	14,1
Rotura válida	10,0	79,1	35,0	44,2	446	563	100	12,71	12,7	13,0	15,9	15,5
Rotura válida	10,0	77,9	35,7	44,7	455	569	100	11,95	12,0	12,2	12,7	14,0
Rotura válida	10,1	79,4	36,7	45,4	468	578	100	11,84	11,8	12,1	12,8	13,8
Rotura válida	10,0	79,2	36,3	45,7	462	582	100	12,79	12,8	13,1	13,4	12,8
Rotura válida	10,0	78,0	35,9	45,5	458	580	100	11,98	12,0	12,3	11,9	11,3
Rotura válida	10,0	79,1	34,3	44,6	437	568	100	12,45	12,5	12,7	12,1	13,0
Rotura válida	9,9	77,7	36,5	45,4	465	578	100	16,55	16,6	16,8	14,5	14,7
Média	10,0	78,4	35,5	44,8	453	570	100	13,94	13,9	14,2	13,6	13,9
Desvio Padrão	0,1	0,8	0,9	0,7	11	8	0	2,16	2,2	2,2	1,3	1,2

A400 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	11,9	112	51,1	63,1	452	559	100	18,59	18,6	18,9	14,7	16,3
Rotura válida	11,9	112	50,4	62,9	446	557	100	18,20	18,2	18,5	14,2	15,2
Rotura válida	11,8	110	48,8	61,1	432	540	100	16,24	16,2	16,5	15,0	16,1
Rotura válida	11,9	112	50,6	62,8	448	556	100	19,95	20,0	20,2	14,3	14,4
Rotura válida	12,0	112	51,5	63,2	455	559	100	16,16	16,2	16,4	15,0	17,5
Rotura válida	11,9	112	50,6	62,6	448	554	100	20,35	20,4	20,6	15,0	16,3
Rotura válida	11,9	112	50,7	62,9	449	557	100	15,83	15,8	16,1	14,9	16,2
Rotura válida	11,9	112	50,7	62,9	449	556	100	14,16	14,2	14,4	14,4	16,2
Rotura válida	11,9	111	50,1	62,2	443	550	100	16,06	16,1	16,3	14,1	15,2
Rotura válida	11,9	112	50,7	62,9	448	556	100	15,79	15,8	16,1	14,2	16,0
Média	11,9	112	50,5	62,7	447	554	100	17,13	17,1	17,4	14,6	15,9
Desvio Padrão	0,0	1	0,7	0,6	6	6	0	2,02	2,0	2,0	0,4	0,8
Rotura válida	11,9	112	48,5	62,8	429	555	100	16,33	16,3	16,6	15,1	15,5
Rotura válida	11,9	112	48,4	62,6	428	554	100	20,99	21,0	21,3	15,7	16,1
Rotura válida	11,9	112	48,4	62,6	428	554	100	18,28	18,3	18,6	15,1	16,6
Rotura válida	11,9	112	48,3	62,4	427	552	100	20,04	20,0	20,3	15,9	15,3
Rotura válida	11,9	112	48,7	62,7	431	555	100	15,89	15,9	16,2	16,2	14,7
Rotura válida	11,9	112	47,7	62,3	422	551	100	17,61	17,6	17,9	16,2	16,6
Rotura válida	11,9	112	47,8	62,0	423	549	100	19,00	19,0	19,3	17,9	16,6
Rotura válida	12,0	112	47,9	62,3	424	551	100	17,30	17,3	17,6	15,8	17,0
Rotura válida	11,9	112	48,2	62,5	426	553	100	18,91	18,9	19,2	17,3	16,9
Rotura válida	11,9	112	47,8	62,3	423	552	100	19,86	19,9	20,1	15,8	15,4
Média	11,9	112	48,1	62,4	426	553	100	18,42	18,4	18,7	16,1	16,1
Desvio Padrão	0,0	0	0,4	0,2	3	2	0	1,65	1,7	1,7	0,9	0,8

A400 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio														
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{EH} ou F _{pa} (kN)	F _m (kN)	R _{EH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' _o (mm)	L' _u -L' _o (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M 300) (%)	A _{gt} (E Q 50) (%)			
Rotura válida	15,9	198	92,3	116	459	575	100	15,08	15,1	15,4	13,5	13,1			
Rotura válida	15,9	198	91,8	115	457	572	100	15,98	16,0	16,3	13,6	-			
Rotura válida	15,8	196	91,4	115	455	571	100	13,80	13,8	14,1	12,8	13,1			
Rotura válida	15,8	197	89,8	113	447	563	100	15,76	15,8	16,0	13,5	13,7			
Rotura válida	15,9	198	91,9	116	457	575	100	14,84	14,8	15,1	12,9	12,7			
Rotura válida	15,9	198	91,1	115	453	570	100	14,83	14,8	15,1	14,0	-			
Rotura válida	15,9	198	91,9	116	457	576	100	15,33	15,3	15,6	13,8	14,0			
Rotura válida	15,9	198	91,1	115	453	570	100	15,60	15,6	15,9	13,3	13,6			
Rotura válida	15,9	198	91,7	115	456	572	100	13,31	13,3	13,6	12,5	12,3			
Rotura válida	15,9	198	91,0	114	453	570	100	16,23	16,2	16,5	13,3	13,5			
Média	15,9	198	91,4	115	455	571	100	15,08	15,1	15,4	13,3	13,3			
Desvio Padrão	0,0	1	0,7	1	3	4	0	0,93	0,9	0,9	0,5	0,6			
													Medição do L' _u ensaio mecânico		
													L' _u	L' _o	A _{gt} V _(manual)
Rotura válida	15,8	196	89,5	115	445	571	100	17,09	17,1	17,4	13,8	13,6	113,83	100,00	13,8
Rotura válida	15,9	198	91,9	117	457	582	100	13,92	13,9	14,2	13,6	13,1	113,64	100,00	13,6
Rotura válida	15,8	197	91,1	116	453	577	100	13,58	13,6	13,9	13,2	13,2	113,17	100,00	13,2
Rotura válida	15,8	197	90,6	115	451	573	100	14,45	14,5	14,7	14,5	14,2	113,91	100,00	13,9
Rotura válida	15,8	196	89,7	115	446	571	100	13,32	13,3	13,6	13,2	14,3	113,49	100,00	13,5
Rotura válida	15,9	198	90,9	116	452	576	100	16,65	16,7	16,9	13,4	13,4	113,72	100,00	13,7
Rotura válida	15,9	198	90,9	116	452	576	100	15,02	15,0	15,3	13,4	13,0	113,32	100,00	13,3
Rotura válida	15,9	198	91,7	116	456	579	100	15,94	15,9	16,2	13,0	12,8	113,40	100,00	13,4
Rotura válida	15,9	198	90,4	116	450	575	100	14,64	14,6	14,9	13,5	13,5	113,56	100,00	13,6
Rotura válida	15,9	198	91,2	116	454	576	100	14,22	14,2	14,5	12,5	12,5	112,45	100,00	12,5
Média	15,9	197	90,8	116	452	575	100	14,88	14,9	15,2	13,4	13,4			13,4
Desvio Padrão	0,0	1	0,8	1	4	3	0	1,29	1,3	1,3	0,5	0,6			0,4

A400 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio														
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' _o (mm)	L' _u -L' _o (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M 300) (%)	A _{gt} (E Q 50) (%)			
Rotura válida	19,6	301	137	172	436	548	100	11,94	11,9	12,2	12,2	13,1			
Rotura válida	19,5	300	133	169	422	539	100	14,17	14,2	14,4	13,8	13,9			
Rotura válida	19,5	300	135	172	431	549	100	13,24	13,2	13,5	14,7	16,4			
Rotura válida	19,6	300	132	170	422	541	100	13,00	13,0	13,3	14,4	14,7			
Rotura válida	19,5	300	132	169	421	539	100	14,52	14,5	14,8	13,3	14,2			
Rotura válida	19,5	300	134	170	426	542	100	12,59	12,6	12,9	12,8	12,1			
Rotura válida	19,5	300	140	174	446	553	100	12,86	12,9	13,1	12,0	11,9			
Rotura válida	19,5	300	135	171	431	544	100	13,23	13,2	13,5	12,5	12,5			
Rotura válida	19,6	300	133	171	424	544	100	13,07	13,1	13,3	13,5	14,4			
Rotura válida	19,6	301	134	171	426	546	100	14,86	14,9	15,1	14,1	15,2			
Média	19,5	300	135	171	428	544	100	13,35	13,3	13,6	13,3	13,8			
Desvio Padrão	0,0	0	2	1	8	5	0	0,90	0,9	0,9	0,9	1,4			
Rotura válida	19,8	309	140	179	446	571	100	13,71	13,7	14,0	13,2	13,8			
Rotura válida	19,9	310	137	176	437	562	100	13,95	14,0	14,2	13,5	14,4			
Rotura válida	19,9	310	139	178	444	568	100	13,61	13,6	13,9	11,3	11,7			
Rotura válida	19,9	310	141	180	448	574	100	14,54	14,5	14,8	13,9	14,1			
Rotura válida	19,9	311	139	178	444	568	100	16,81	16,8	17,1	13,7	14,0			
Rotura válida	19,9	310	139	178	444	566	100	13,86	13,9	14,1	13,5	13,4			
Rotura válida	20,0	314	139	179	444	569	100	16,86	16,9	17,1	14,5	15,0			
Rotura válida	19,9	312	139	177	442	565	100	16,17	16,2	16,5	12,9	13,0			
Rotura válida	19,9	310	141	181	449	577	100	13,20	13,2	13,5	13,5	13,4			
Rotura válida	19,9	311	140	178	446	566	100	13,51	13,5	13,8	13,0	13,8			
Média	19,9	311	139	179	444	569	100	14,62	14,6	14,9	13,3	13,7			
Desvio Padrão	0,0	1	1	1	3	4	0	1,43	1,4	1,4	0,8	0,9			
Medição do L' _u ensaio mecânico															
Rotura válida	19,8	309	137	180	437	573	100	14,53	14,5	14,8	-	-	L' _u	L' _o	A _{gt} V (manual)
Rotura válida	19,9	310	137	178	437	566	100	13,99	14,0	14,3	-	-	-	-	-
Rotura válida	19,9	310	138	179	439	570	100	13,14	13,1	13,4	12,8	13,7	113,10	100,00	13,1
Rotura válida	19,9	311	139	181	443	578	100	13,81	13,8	14,1	14,1	14,1	113,58	100,00	13,6
Rotura válida	19,9	311	138	179	440	570	100	15,86	15,9	16,1	11,8	12,1	111,92	100,00	11,9
Rotura válida	19,8	309	139	179	441	569	100	13,85	13,9	14,1	13,9	14,4	113,91	100,00	13,9
Rotura válida	20,0	314	141	183	448	582	100	13,55	13,6	13,8	14,0	14,5	113,85	100,00	13,9
Rotura válida	19,9	312	139	181	444	576	100	13,80	13,8	14,1	12,9	12,6	113,11	100,00	13,1
Rotura válida	19,9	310	139	179	441	571	100	14,18	14,2	14,5	13,7	14,0	113,81	100,00	13,8
Rotura válida	19,9	311	138	180	441	572	100	17,46	17,5	17,7	13,6	13,5	113,55	100,00	13,6
Média	19,9	311	139	180	441	573	100	14,42	14,4	14,7	13,4	13,6			13,4
Desvio Padrão	0,1	2	1	1	3	5	0	1,29	1,3	1,3	0,8	0,9			0,7

A400 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' _o (mm)	L' _u -L' _o (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	24,8	482	215	270	438	550	100	15,82	15,8	16,1	14,0	14,6
Rotura válida	24,7	480	213	269	435	548	100	14,90	14,9	15,2	13,8	14,3
Rotura válida	24,8	481	214	270	436	549	100	14,16	14,2	14,4	13,1	13,4
Rotura válida	24,8	481	214	270	437	550	100	15,06	15,1	15,3	14,0	13,5
Rotura válida	24,8	482	216	272	439	553	100	16,77	16,8	17,0	14,6	15,6
Rotura válida	24,7	481	214	270	436	550	100	14,85	14,9	15,1	12,5	13,0
Rotura válida	24,8	482	215	269	439	548	100	16,55	16,6	16,8	-	-
Rotura válida	24,7	480	214	270	437	551	100	14,21	14,2	14,5	-	-
Rotura válida	24,8	481	215	270	438	549	100	16,30	16,3	16,6	-	-
Rotura válida	24,8	482	216	271	440	551	100	15,96	16,0	16,2	-	-
Média	24,8	481	215	270	437	550	100	15,46	15,5	15,7	13,7	14,1
Desvio Padrão	0,0	1	1	1	2	1	0	0,95	0,9	0,9	0,7	1,0

A500 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A ₀ (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	8,0	49,8	29,3	33,6	582	667	100	8,17	8,2	8,5	8,7	9,7
Rotura válida	8,0	49,7	29,0	33,7	576	669	100	11,01	11,0	11,3	10,1	10,4
Rotura válida	8,0	49,9	29,4	34,1	584	678	100	9,53	9,5	9,9	10,8	10,9
Rotura válida	8,0	49,9	29,0	33,3	576	661	100	8,60	8,6	8,9	7,9	7,9
Rotura válida	8,0	49,7	28,2	33,0	560	656	100	10,89	10,9	11,2	10,6	10,8
Rotura válida	8,0	49,8	28,3	33,2	562	661	100	8,69	8,7	9,0	8,9	9,1
Rotura válida	8,0	49,7	29,2	33,8	580	673	100	9,87	9,9	10,2	9,4	9,2
Rotura válida	8,0	49,8	28,9	33,6	574	667	100	9,17	9,2	9,5	8,7	8,7
Rotura válida	8,0	49,8	28,9	33,6	575	669	100	9,40	9,4	9,7	9,1	9,1
Rotura válida	8,0	49,9	29,1	33,5	578	666	100	8,54	8,5	8,9	8,3	8,2
Média	8,0	49,8	28,9	33,5	575	667	100	9,39	9,4	9,7	9,3	9,4
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,4	0,3	8	6	0	0,97	1,0	1,0	1,0	1,0
Rotura válida	8,0	50,0	27,2	31,4	541	625	100	11,78	11,8	12,1	12,0	12,3
Rotura válida	8,0	50,0	27,1	31,3	539	621	100	12,42	12,4	12,7	11,8	11,7
Rotura válida	7,9	49,2	27,3	31,4	543	624	100	8,29	8,3	8,6	7,1	7,5
Rotura válida	8,0	49,8	26,7	31,0	530	616	100	11,48	11,5	11,8	13,4	12,6
Rotura válida	8,0	49,7	26,7	31,7	530	631	100	13,02	13,0	13,3	11,7	11,9
Rotura válida	7,9	49,5	26,7	31,4	531	623	100	13,34	13,3	13,7	11,4	11,3
Rotura válida	8,0	49,7	26,6	31,0	529	616	100	15,36	15,4	15,7	11,7	12,0
Rotura válida	7,9	49,5	26,7	31,3	530	623	100	13,29	13,3	13,6	11,6	11,5
Rotura válida	7,9	49,6	26,8	31,4	532	623	100	11,99	12,0	12,3	12,9	12,6
Rotura válida	7,9	49,5	27,7	32,0	550	637	100	9,20	9,2	9,5	10,8	11,4
Média	8,0	49,7	26,9	31,4	536	624	100	12,02	12,0	12,3	11,4	11,5
Desvio Padrão	0,0	0,2	0,4	0,3	7	6	0	2,05	2,1	2,1	1,7	1,5
Medição do L'_u ensaio mecânico												
										L' _u	L' ₀	A _{gt} V _(manual)
Rotura válida	8,0	50,0	27,3	31,8	542	633	100	11,78	11,8	12,1	12,1	12,7
Rotura válida	8,0	50,1	27,0	31,5	537	626	100	11,20	11,2	11,5	12,1	12,8
Rotura válida	7,9	49,1	26,8	31,7	533	630	100	11,23	11,2	11,5	11,5	10,3
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	8,0	49,7	26,6	31,4	529	623	100	14,80	14,8	15,1	10,7	11,4
Rotura válida	8,0	49,8	26,7	32,1	531	638	100	12,20	12,2	12,5	11,5	11,7
Rotura válida	7,9	49,4	26,8	31,3	532	622	100	11,90	11,9	12,2	13,3	13,8
Rotura válida	7,9	49,3	26,1	31,2	520	619	100	11,18	11,2	11,5	11,3	11,0
Rotura válida	7,9	49,6	26,3	31,6	523	629	100	13,13	13,1	13,4	10,7	10,7
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	8,0	50,0	28,1	32,9	559	655	100	10,46	10,5	10,8	8,9	9,5
Rotura válida	7,9	49,5	26,5	31,2	526	619	100	11,83	11,8	12,1	10,2	10,0
Média	8,0	49,7	26,8	31,7	533	629	100	11,97	12,0	12,3	11,2	11,4
Desvio Padrão	0,0	0,3	0,6	0,5	11	11	0	1,23	1,2	1,2	1,2	1,4

A500 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M 300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	9,9	77,1	42,7	50,2	544	639	100	7,72	7,7	8,0	7,3	7,1
Rotura válida	9,9	77,2	41,9	50,2	533	639	100	9,86	9,9	10,2	8,9	9,6
Rotura válida	9,9	77,4	41,5	50,3	529	641	100	10,79	10,8	11,1	11,5	11,4
Rotura válida	9,9	77,2	40,9	49,7	521	633	100	7,52	7,5	7,8	10,0	8,5
Rotura válida	9,9	77,1	42,2	50,5	537	643	100	9,01	9,0	9,3	9,2	9,6
Rotura válida	9,9	77,1	41,8	50,3	533	641	100	8,61	8,6	8,9	9,6	8,8
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	9,9	77,3	42,3	50,0	539	637	100	11,26	11,3	11,6	10,2	10,1
Rotura válida	9,9	77,3	41,5	50,0	529	637	100	8,75	8,8	9,1	8,6	8,8
Rotura válida	9,9	77,1	42,4	51,0	540	649	100	10,58	10,6	10,9	11,7	11,5
Rotura válida	9,9	77,1	42,5	51,2	542	652	100	9,12	9,1	9,4	8,4	8,3
Média	9,9	77,2	42,0	50,3	535	641	100	9,32	9,3	9,6	9,5	9,4
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,6	0,4	7	5	0	1,27	1,3	1,3	1,4	1,4
Rotura válida	10,0	77,9	42,0	48,3	535	615	100	13,30	13,3	13,6	11,8	11,7
Rotura válida	9,9	77,7	40,3	47,2	514	602	100	13,20	13,2	13,5	12,1	11,8
Rotura válida	9,9	77,7	40,7	47,4	518	604	100	15,67	15,7	16,0	12,5	12,0
Rotura válida	10,0	78,2	41,2	47,4	524	604	100	15,39	15,4	15,7	13,7	13,5
Rotura válida	10,0	77,8	41,7	48,2	531	614	100	12,72	12,7	13,0	12,6	12,4
Rotura válida	9,9	77,8	41,3	47,8	526	609	100	14,41	14,4	14,7	12,5	12,4
Rotura válida	10,0	78,0	42,4	48,7	540	621	100	9,90	9,9	10,2	9,9	12,2
Rotura válida	10,0	78,0	41,4	48,0	528	611	100	11,05	11,1	11,4	11,1	13,2
Rotura válida	10,0	78,3	41,8	48,2	532	614	100	13,82	13,8	14,1	12,8	12,3
Rotura válida	9,9	77,7	41,7	48,1	532	613	100	14,66	14,7	15,0	12,8	13,9
Média	10,0	77,9	41,4	47,9	528	611	100	13,41	13,4	13,7	12,2	12,5
Desvio Padrão	0,0	0,2	0,6	0,5	8	6	0	1,83	1,8	1,8	1,1	0,7
Rotura válida	10,0	77,9	44,9	54,5	571	694	100	10,93	10,9	11,3	9,8	9,7
Rotura válida	10,0	78,1	44,7	54,3	569	692	100	10,20	10,2	10,5	9,6	9,5
Rotura válida	9,9	77,3	44,3	54,1	564	689	100	10,88	10,9	11,2	10,0	11,1
Rotura válida	10,0	78,1	45,0	54,4	573	693	100	10,03	10,0	10,4	-	-
Rotura válida	10,0	77,9	44,5	54,2	567	691	100	9,67	9,7	10,0	8,6	8,4
Rotura válida	10,0	77,9	45,6	55,2	581	703	100	9,00	9,0	9,4	8,4	8,3
Rotura válida	10,0	78,0	44,7	54,4	570	693	100	10,22	10,2	10,6	-	-
Rotura válida	10,0	78,1	44,8	54,3	571	691	100	10,36	10,4	10,7	9,6	9,0
Rotura válida	9,9	77,4	44,1	53,6	562	683	100	9,33	9,3	9,7	9,3	8,5
Rotura válida	10,0	78,0	45,7	54,5	582	695	100	8,59	8,6	8,9	8,4	7,8
Média	10,0	77,9	44,8	54,4	571	693	100	9,92	9,9	10,3	9,2	9,0
Desvio Padrão	0,0	0,3	0,5	0,4	6	5	0	0,77	0,8	0,8	0,7	1,0

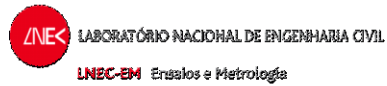
A500 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' ₀ -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M 300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	11,8	109	66,2	76,4	586	676	100	10,02	10,0	10,4	-	-
Rotura válida	11,8	109	66,5	77,4	588	685	100	10,43	10,4	10,8	-	-
Rotura válida	11,8	109	66,1	76,9	585	680	100	8,70	8,7	9,0	8,1	8,8
Rotura válida	11,8	109	66,3	77,4	587	685	100	8,37	8,4	8,7	9,2	9,4
Rotura válida	11,8	109	66,5	76,8	589	679	100	10,02	10,0	10,4	9,0	9,2
Rotura válida	11,8	109	66,2	78,0	585	690	100	7,70	7,7	8,0	7,4	7,6
Rotura válida	11,8	110	66,2	76,9	586	680	100	9,68	9,7	10,0	8,0	8,3
Rotura obtida a uma distância da amarração inferior a 2,5 d	11,8	110	66,9	77,1	592	682	100	9,19	9,2	9,5	8,8	8,8
Rotura válida	11,8	110	66,1	76,9	585	681	100	10,65	10,7	11,0	9,1	10,4
Rotura válida	11,8	110	67,3	78,2	595	692	100	8,47	8,5	8,8	8,4	8,7
Média	11,8	109	66,4	77,2	588	683	100	9,32	9,3	9,7	8,5	8,9
Desvio Padrão	0,0	0	0,4	0,6	4	5	0	0,99	1,0	1,0	0,6	0,8

A500 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	14,1	157	88,9	105	577	680	100	11,24	11,2	11,6	10,8	11,0
Rotura válida	14,1	156	88,7	105	576	682	100	9,07	9,1	9,4	8,9	9,3
Rotura válida	14,1	157	90,7	105	589	683	100	10,01	10,0	10,4	10,3	10,4
Rotura válida	14,1	156	88,4	104	574	678	100	11,60	11,6	11,9	9,9	10,0
Rotura válida	14,1	157	89,8	105	583	680	100	9,27	9,3	9,6	9,5	9,5
Rotura válida	14,0	155	91,8	105	596	683	100	9,11	9,1	9,5	8,9	9,2
Rotura válida	14,1	156	93,8	110	609	713	100	10,01	10,0	10,4	8,9	8,8
Rotura válida	14,0	155	91,5	105	594	680	100	10,49	10,5	10,8	9,5	10,3
Rotura válida	14,1	156	89,5	105	581	681	100	12,46	12,5	12,8	9,9	10,5
Rotura válida	14,1	156	90,8	105	590	684	100	9,26	9,3	9,6	9,2	9,7
Média	14,1	156	90,4	105	587	684	100	10,25	10,3	10,6	9,6	9,9
Desvio Padrão	0,0	1	1,7	2	11	10	0	1,18	1,2	1,2	0,6	0,7

A500 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	24,5	473	268	317	547	645	100	10,56	10,6	10,9	10,1	9,8
Rotura válida	24,5	473	266	314	541	640	100	10,02	10,0	10,3	8,9	8,8
Rotura válida	24,6	474	266	313	542	637	100	13,10	13,1	13,4	10,3	9,9
Rotura válida	24,6	475	267	315	543	642	100	10,50	10,5	10,8	9,9	9,9
Rotura válida	24,6	474	266	314	542	639	100	10,95	11,0	11,3	9,9	9,9
Rotura válida	24,5	472	268	316	547	644	100	10,45	10,5	10,8	9,5	9,0
Rotura válida	24,5	472	265	313	539	638	100	9,38	9,4	9,7	9,1	8,8
Rotura válida	24,6	474	268	317	546	645	100	10,59	10,6	10,9	9,1	9,2
Rotura válida	24,6	473	261	310	532	631	100	8,09	8,1	8,4	7,9	7,8
Rotura válida	24,5	473	267	314	543	640	100	10,72	10,7	11,0	9,8	9,6
Média	24,6	473	266	314	542	640	100	10,44	10,4	10,8	9,5	9,3
Desvio Padrão	0,0	1	2	2	4	4	0	1,26	1,3	1,3	0,7	0,7
Rotura válida	25,3	503	288	340	588	692	100	12,42	12,4	12,8	10,4	10,7
Rotura válida	25,1	496	284	335	579	682	100	12,33	12,3	12,7	-	-
Rotura válida	25,3	503	290	341	591	694	100	12,52	12,5	12,9	8,9	9,4
Rotura válida	25,1	494	282	332	574	677	100	13,63	13,6	14,0	10,0	10,4
Rotura válida	25,3	503	291	341	593	695	100	11,12	11,1	11,5	-	-
Rotura válida	25,1	493	283	332	576	677	100	12,24	12,2	12,6	9,8	9,9
Rotura válida	25,1	494	283	334	576	680	100	12,49	12,5	12,8	10,2	10,0
Rotura válida	25,1	495	282	334	574	680	100	12,38	12,4	12,7	10,1	9,8
Rotura válida	25,3	503	288	339	586	691	100	11,10	11,1	11,4	10,0	10,0
Rotura válida	25,1	494	282	333	574	678	100	11,89	11,9	12,2	10,8	10,2
Média	25,2	498	285	336	581	685	100	12,21	12,2	12,6	10,0	10,1
Desvio Padrão	0,1	5	4	4	7	8	0	0,73	0,7	0,7	0,5	0,4

A500 NR SD



ENSAIO DE TRAÇÃO EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

Localização da rotura	Resultados de Ensaio											
	d (mm)	S ₀ (mm ²)	F _{eH} ou F _{p a} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	L' ₀ (mm)	L' _u -L' ₀ (mm)	A _g (%)	A _{gt} (manual) (%)	A _{gt} (M300) (%)	A _{gt} (EQ 50) (%)
Rotura válida	31,8	792	450	545	560	677	100	10,77	10,8	11,1	9,3	8,0
Rotura válida	31,8	797	455	548	566	681	100	9,65	9,7	10,0	8,5	9,1
Rotura válida	31,8	794	454	546	564	679	100	8,16	8,2	8,5	7,5	7,2
Rotura válida	31,9	797	452	546	562	679	100	9,16	9,2	9,5	8,1	8,4
Rotura válida	31,8	792	452	545	562	678	100	8,92	8,9	9,3	8,2	8,0
Rotura válida	31,8	794	455	546	566	679	100	8,15	8,2	8,5	7,4	8,1
Rotura válida	31,8	792	453	544	564	677	100	8,99	9,0	9,3	8,8	8,8
Rotura válida	31,8	795	456	547	567	681	100	9,85	9,8	10,2	9,2	8,3
Rotura válida	31,8	793	452	544	562	676	100	12,08	12,1	12,4	9,0	8,3
Rotura válida	31,8	794	452	546	562	680	100	8,28	8,3	8,6	7,7	8,8
Média	31,8	794	453	546	563	679	100	9,40	9,4	9,7	8,4	8,3
Desvio Padrão	0,0	2	2	1	2	2	0	1,25	1,3	1,3	0,7	0,5